



## 第2章 负反馈放大电路

在放大电路中引入负反馈是改善放大电路性能非常有效和最常用的方法。

本章主要讨论：

- 反馈的分类与组态判断
- 负反馈对放大电路性能的影响
- 集成运放构成的负反馈电路
- 深度负反馈放大电路的近似计算
- 负反馈放大电路的稳定性分析



## 2.1 反馈的基本概念

### 一、反馈原理框图及基本概念

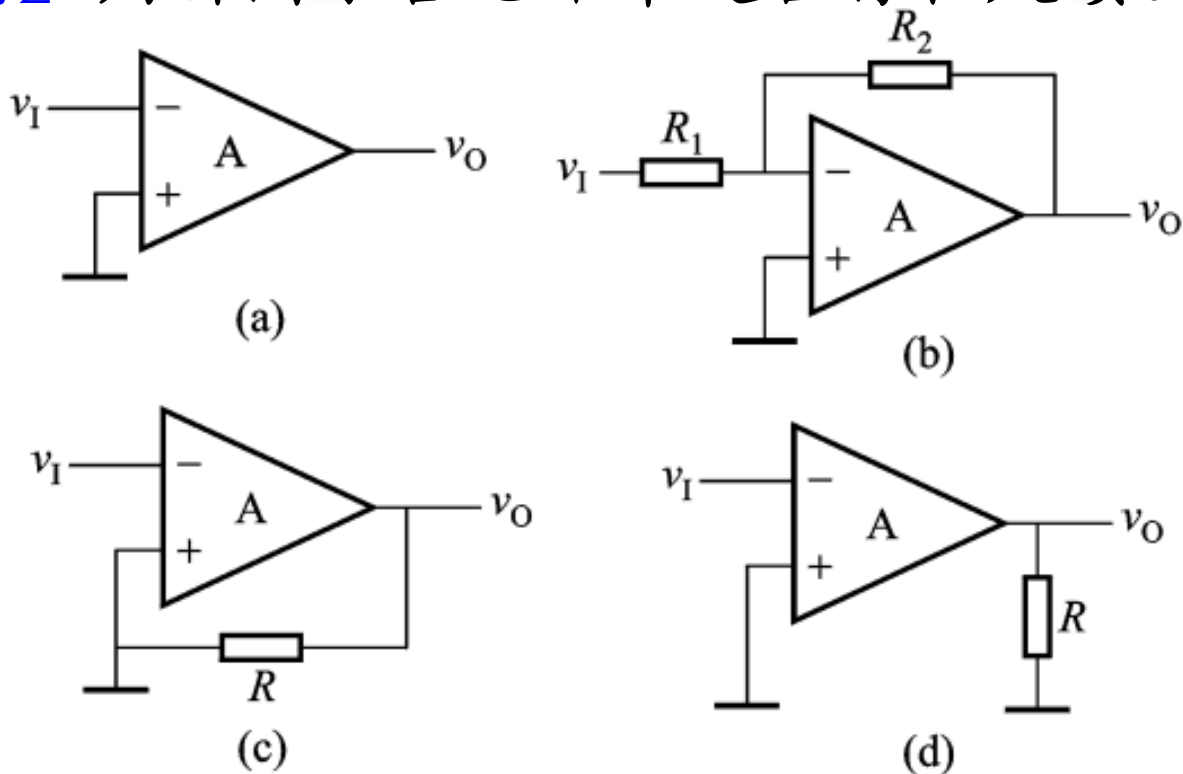
反馈是指放大器输出负载上的电压或电流的一部分（或全部），通过一定的电路形式（称为反馈网络），送回到输入回路，以对放大器的输入电压或电流产生影响，从而使输出负载电压或电流得到自动调节。

- ✧ 闭环系统，**反馈放大器**
- ✧ 开环系统，**基本放大器**
- ✧ 反馈的必要性

## ➤ 有无反馈的判断

✧ 是否存在将输出回路与输入回路相连接的通路(即反馈通路), 输出量的大小是否会影响放大电路的净输入。

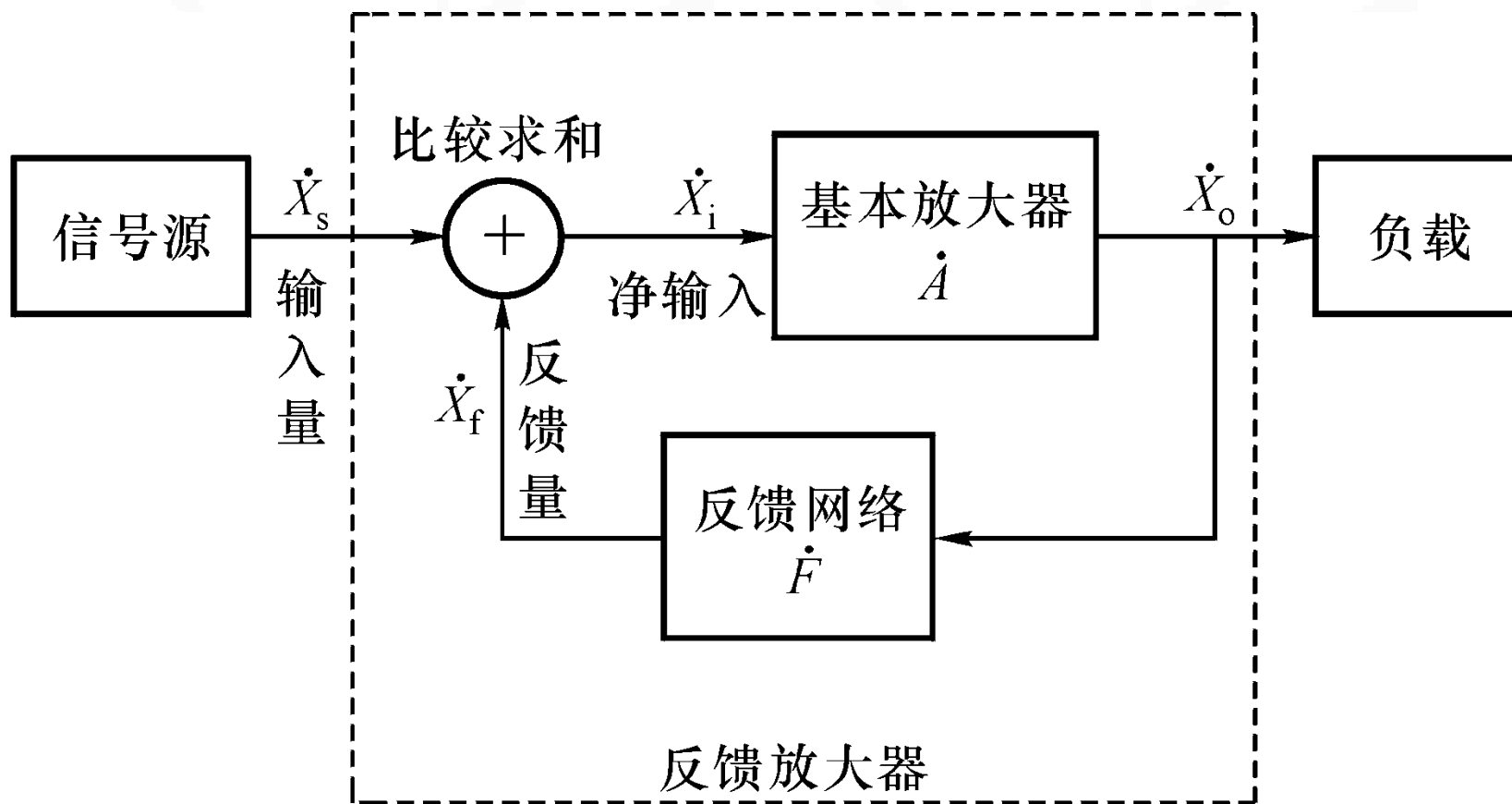
【示例】 判断图示各电路中是否存在反馈。



【解】 (b)有反馈，其余均无反馈。



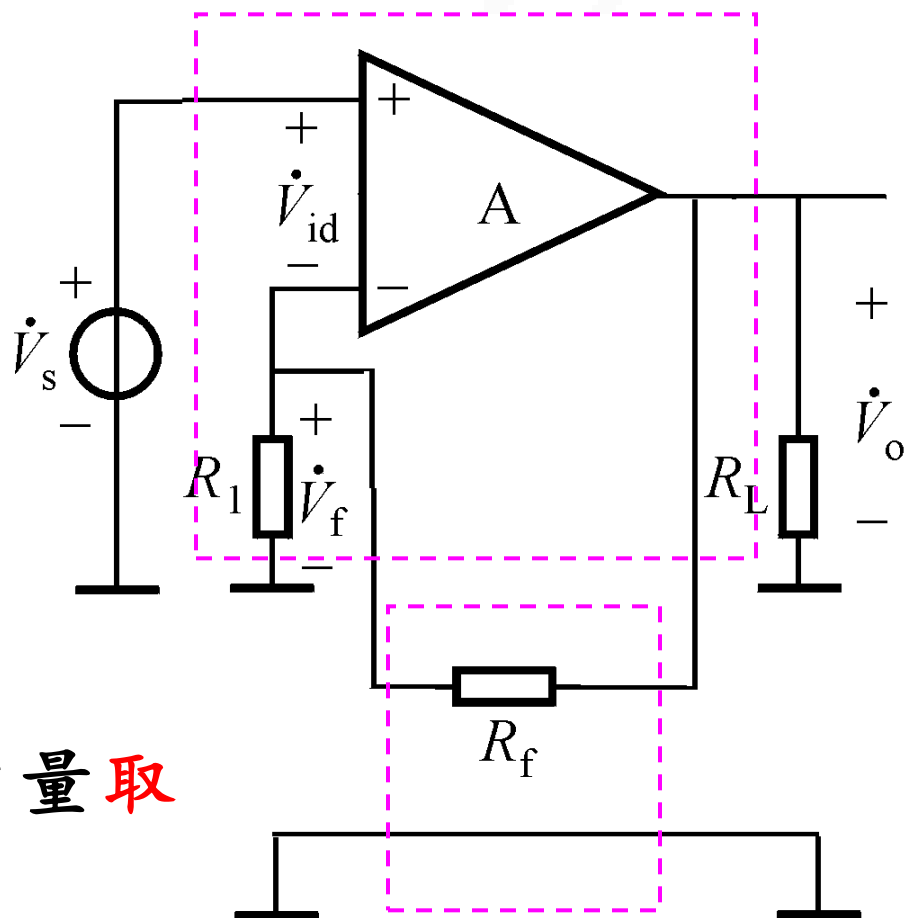
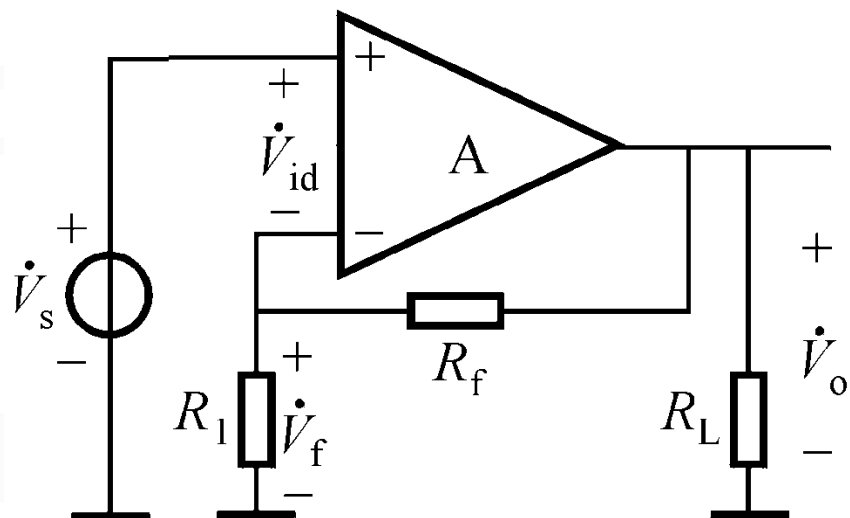
## ➤ 反馈框图



✧  $X$ 为电压或电流

✧ 输入/净输入

## 【示例】



### ➤ 反馈网络的功能

- ① 在放大器负载侧对输出量**取**样；
- ② 将取样电压或电流送回到放大器的输入回路，与输入信号进行**比较求和**。

框图

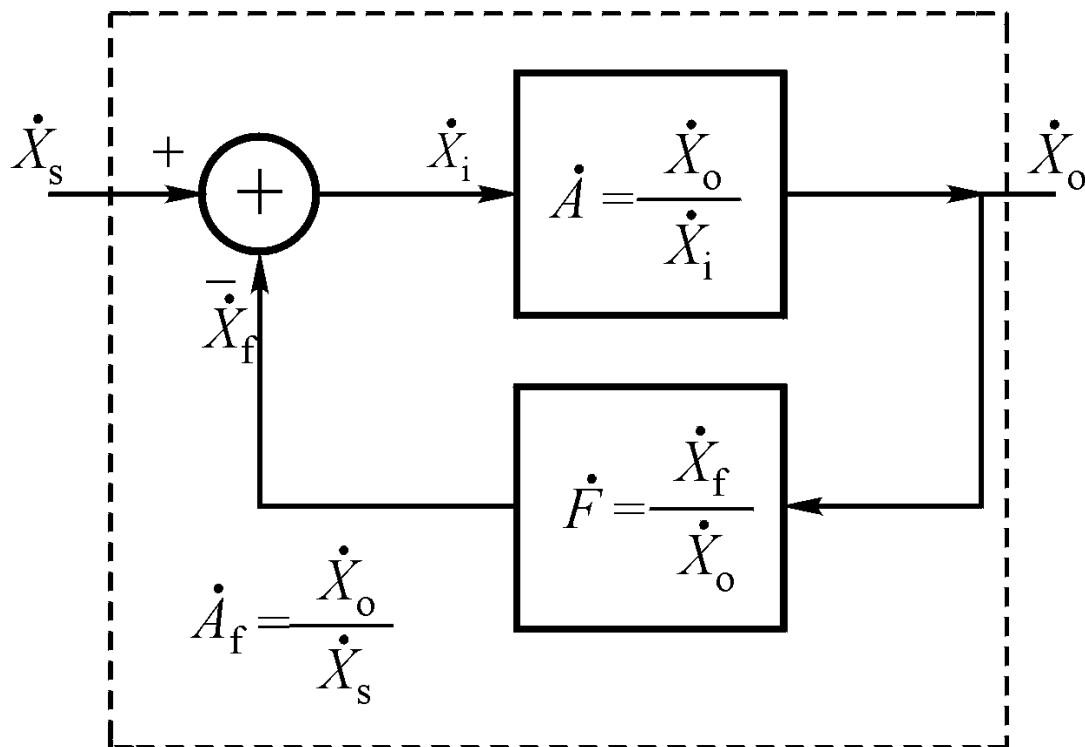
## ➤ 负反馈放大器的增益函数

✧ 开环增益:

$$\dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$$

✧ 反馈系数:

$$\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$



✧ 回路(或环路)增益:

$$\dot{A}\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_i}$$

✧ 闭环增益:

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s}$$

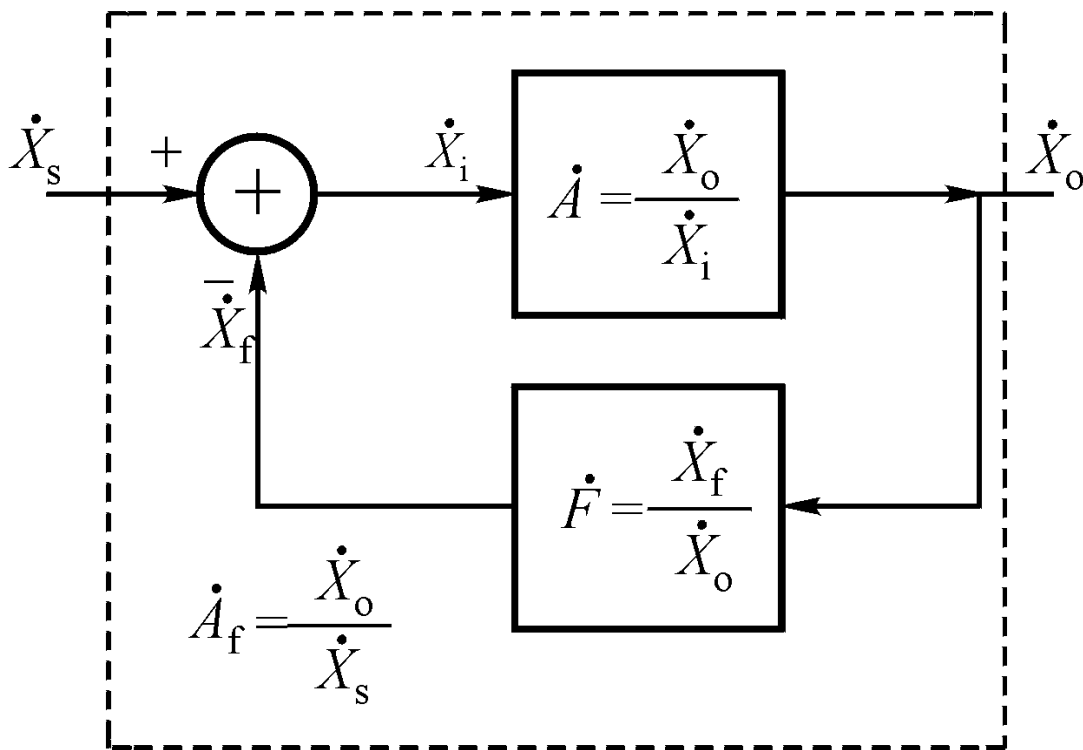
## ➤ 用A和F表示闭环增益

$$\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{X}_f$$

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i + \dot{X}_f}$$

$$= \frac{\dot{A}\dot{X}_i}{\dot{X}_i + \dot{A}\dot{F}\dot{X}_i}$$

$$= \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



$|1 + \dot{A}\dot{F}|$  称为**反馈深度**。反馈深度的大小反映了加入反馈后净输入量的变化程度。

$$\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{A}\dot{F}\dot{X}_i$$

$$\dot{X}_i = \frac{\dot{X}_s}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$



考虑闭环增益的幅值： $|\dot{A}_f| = \frac{|\dot{A}|}{|1 + \dot{A}\dot{F}|}$

✧ 如果 $|1 + \dot{A}\dot{F}| > 1$ 时，闭环增益 $|\dot{A}_f| < |\dot{A}|$ ，说明所引入的反馈是**负反馈**，并使闭环增益下降为开环时的 $1/|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 。若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，则为**深度负反馈**。

$$\dot{A}_f \approx \frac{\dot{A}}{\dot{A}\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}$$

✧ 若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| < 1$ ，则 $|\dot{A}_f| > |\dot{A}|$ ，表示放大电路中引入了**正反馈**。

✧ 若 $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$ ，这是正反馈中的极端情况，此时 $|\dot{A}_f| \rightarrow \infty$ ，说明在无输入的条件下，放大器也有输出，此时放大器产生了**自激振荡**。





## 二、负反馈放大电路的分类与四种基本组态

### ➤ 反馈分类

- ✧ 按反馈极性分：正反馈、负反馈
- ✧ 按取样方式分：电压反馈、电流反馈
- ✧ 按求和方式分：并联反馈、串联反馈
- ✧ 按反馈通路分：直流反馈、交流反馈
- ✧ 按反馈路径个数分：单环反馈、多环反馈

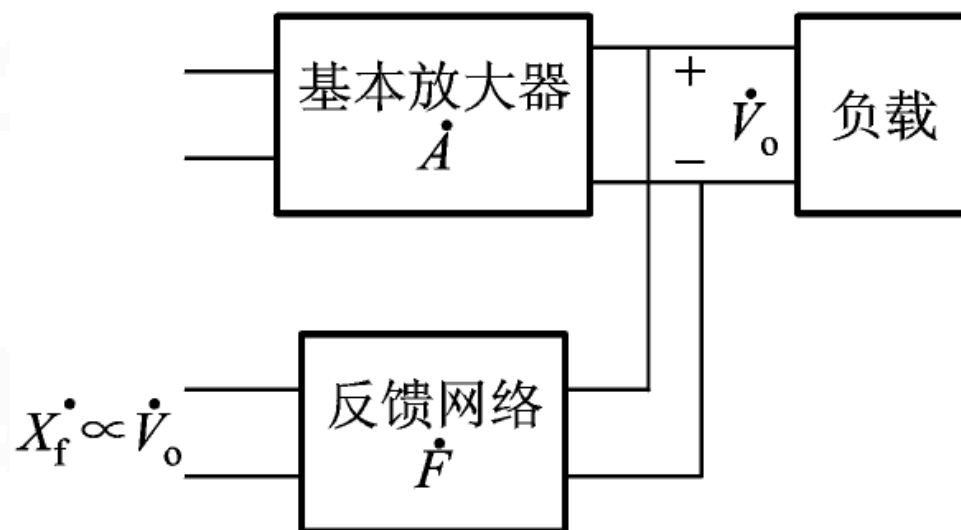


## ➤ 正反馈与负反馈

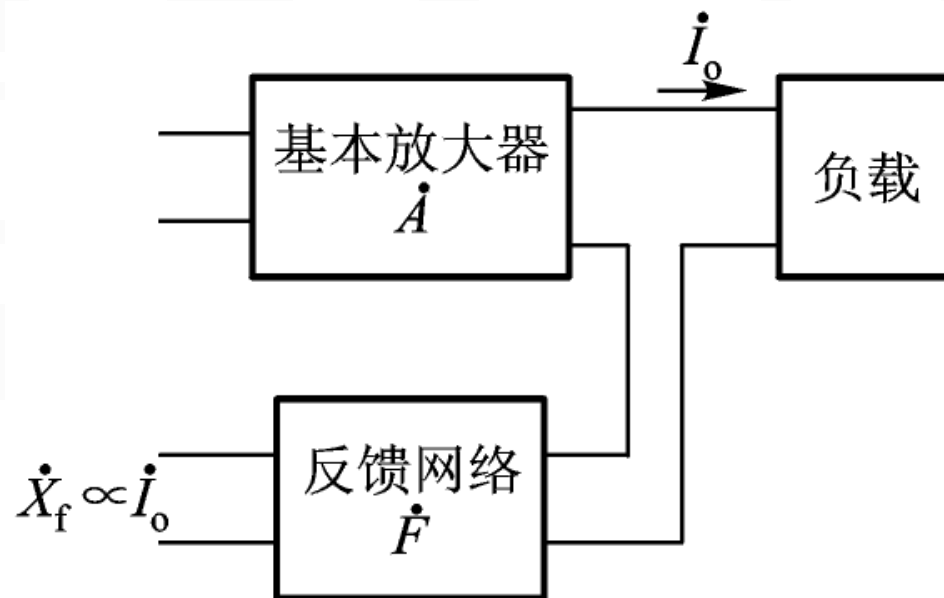
- ✧ 若比较求和后，使净输入量增大（因而输出量也增大），称为正反馈
- ✧ 若比较求和后，使净输入量减小（因而输出量也减小），称为负反馈

## 取样的两种方式

✧ 对输出电压取样，  
称为**电压反馈**

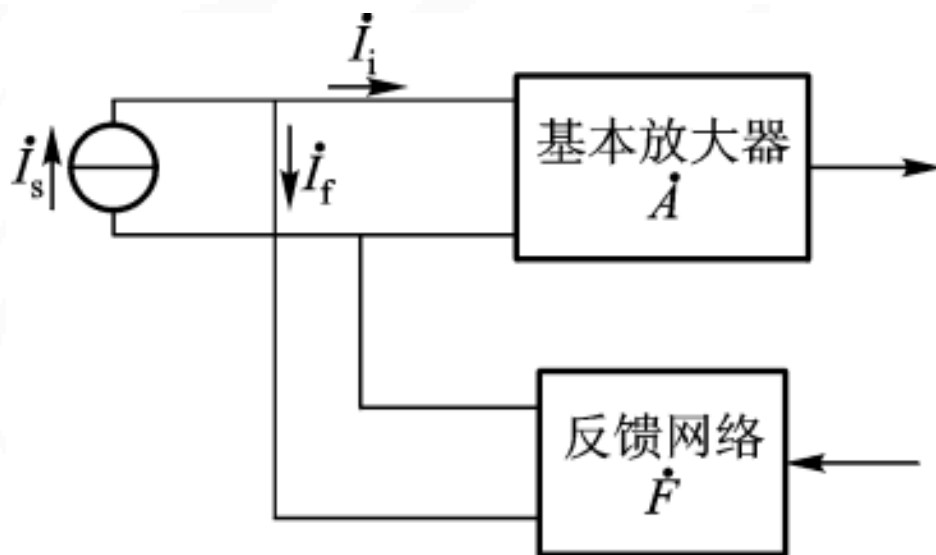
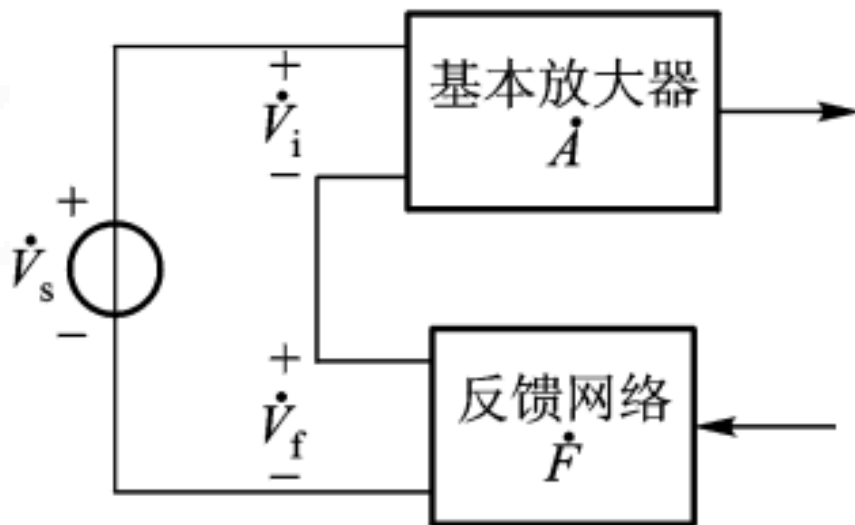


✧ 对输出电流取样，  
称为**电流反馈**



## ➤ 比较求和的两种方式

- ✧ 在输入回路以**串联**方式，对**信号源电压**、**反馈电压**进行比较，称为**串联反馈**
- ✧ 在输入回路以**并联**方式，对**信号源电流**、**反馈电流**进行比较，称为**并联反馈**



## ➤ 负反馈的四种基本组态

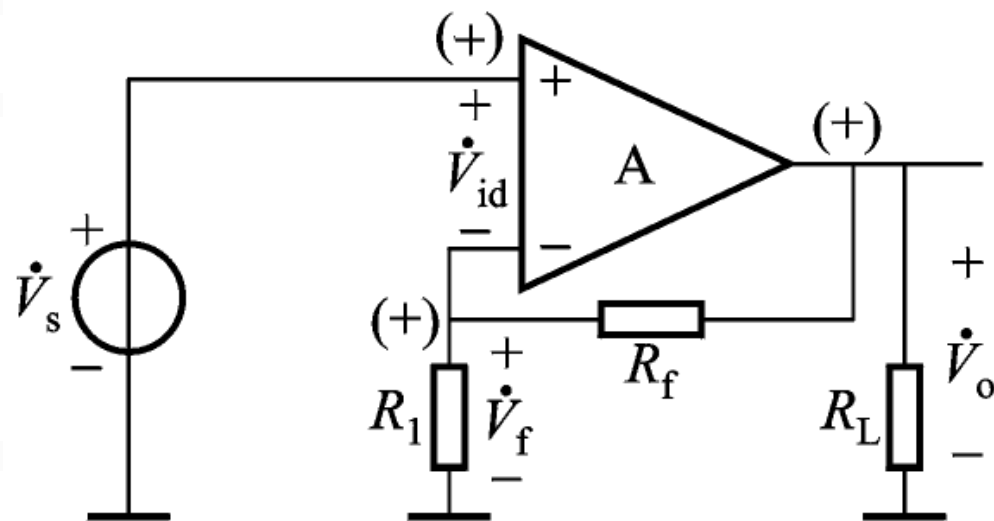
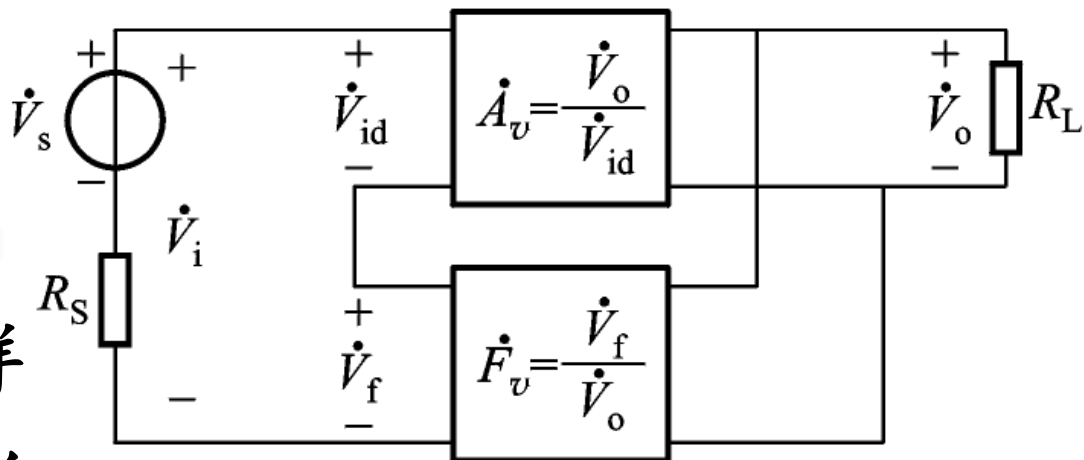
### 1、电压串联负反馈

✧ 输出端对电压取样

✧ 输入回路以电压形式进行比较：

$$\dot{V}_{id} = \dot{V}_s - \dot{V}_f$$

典型电路

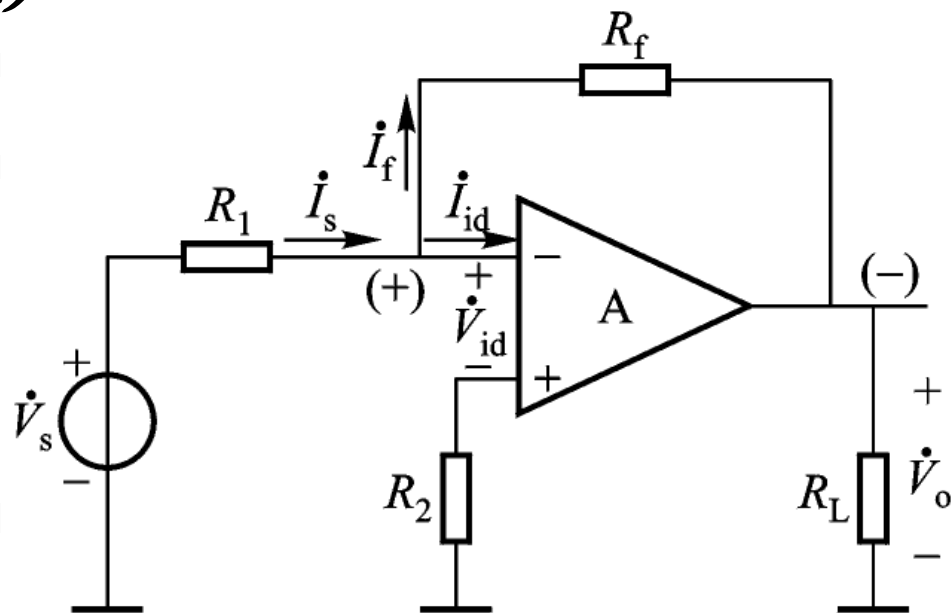
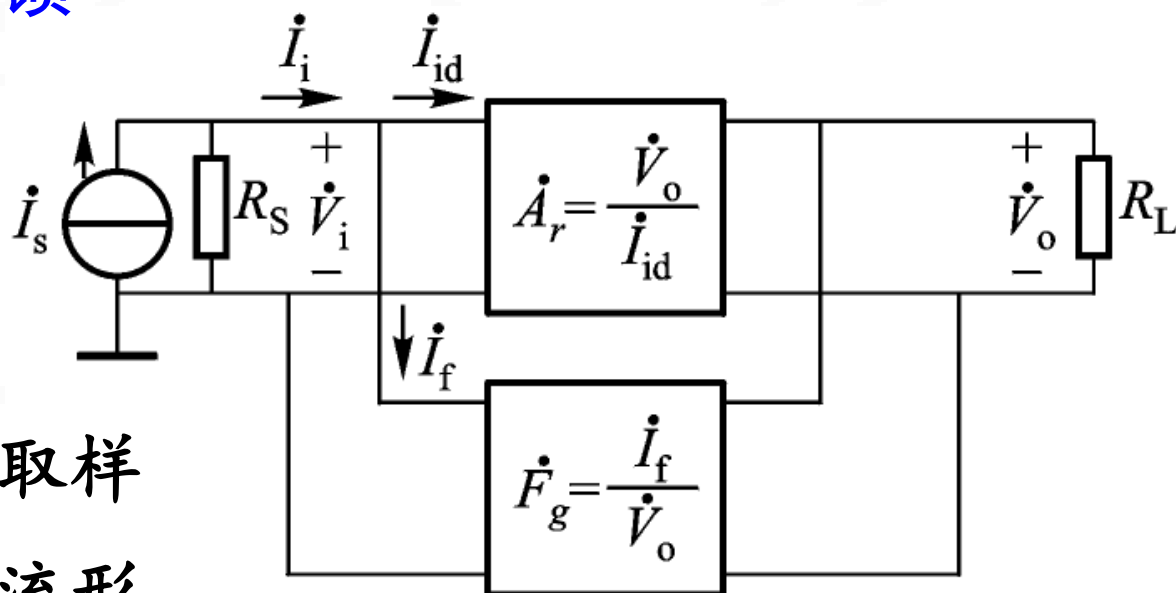


## 2、电压并联负反馈

- ✧ 输出端对电压取样
- ✧ 输入回路以电流形式进行比较：

$$\dot{I}_{id} = \dot{I}_s - \dot{I}_f$$

典型电路



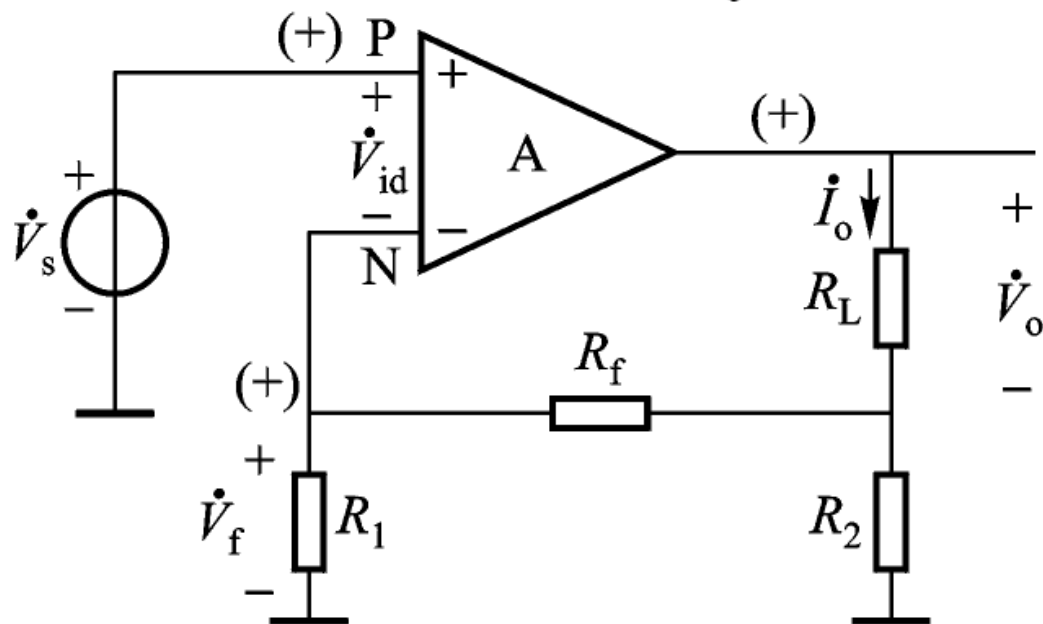
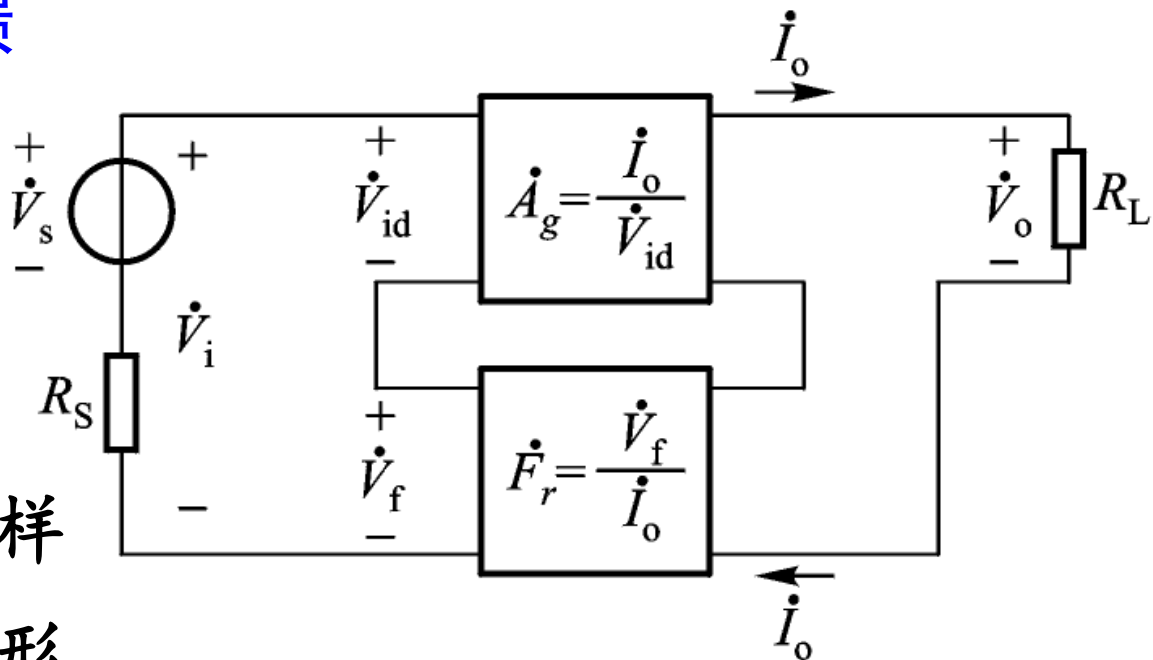
### 3、电流串联负反馈

✧ 输出端对电流取样

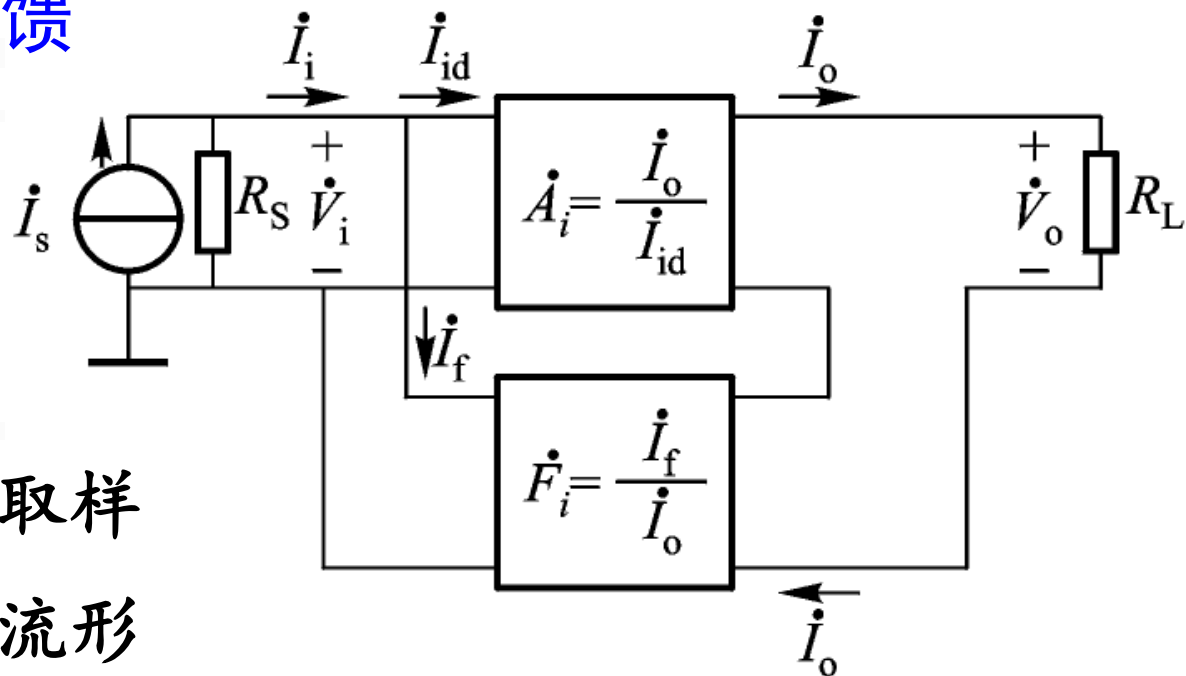
✧ 输入回路以电压形式进行比较：

$$\dot{V}_{id} = \dot{V}_s - \dot{V}_f$$

典型电路



## 4、电流并联负反馈

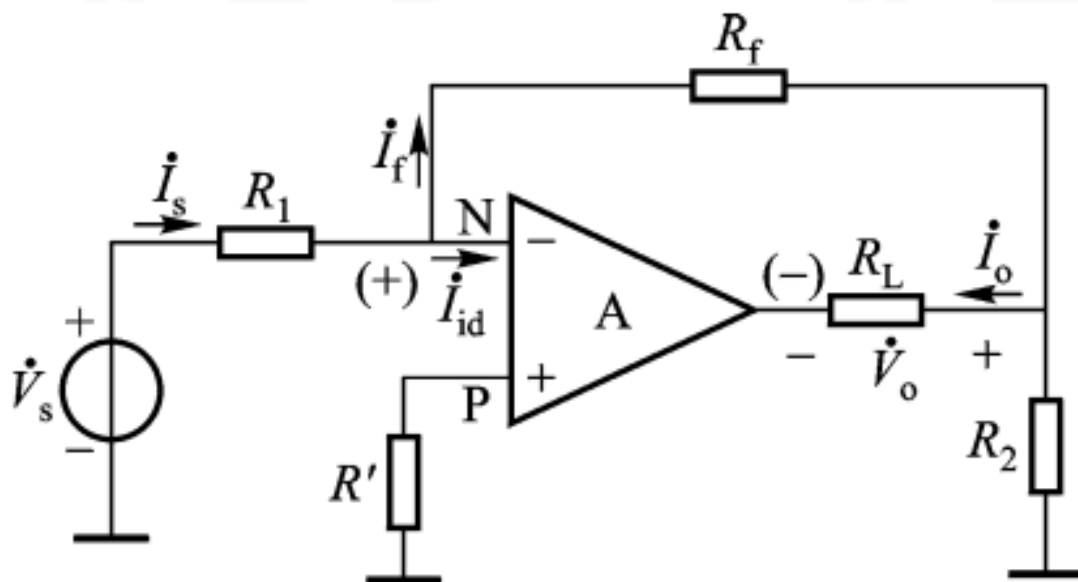


✧ 输出端对电流取样

✧ 输入回路以电流形式进行比较：

$$\dot{I}_{id} = \dot{I}_s - \dot{I}_f$$

典型电路







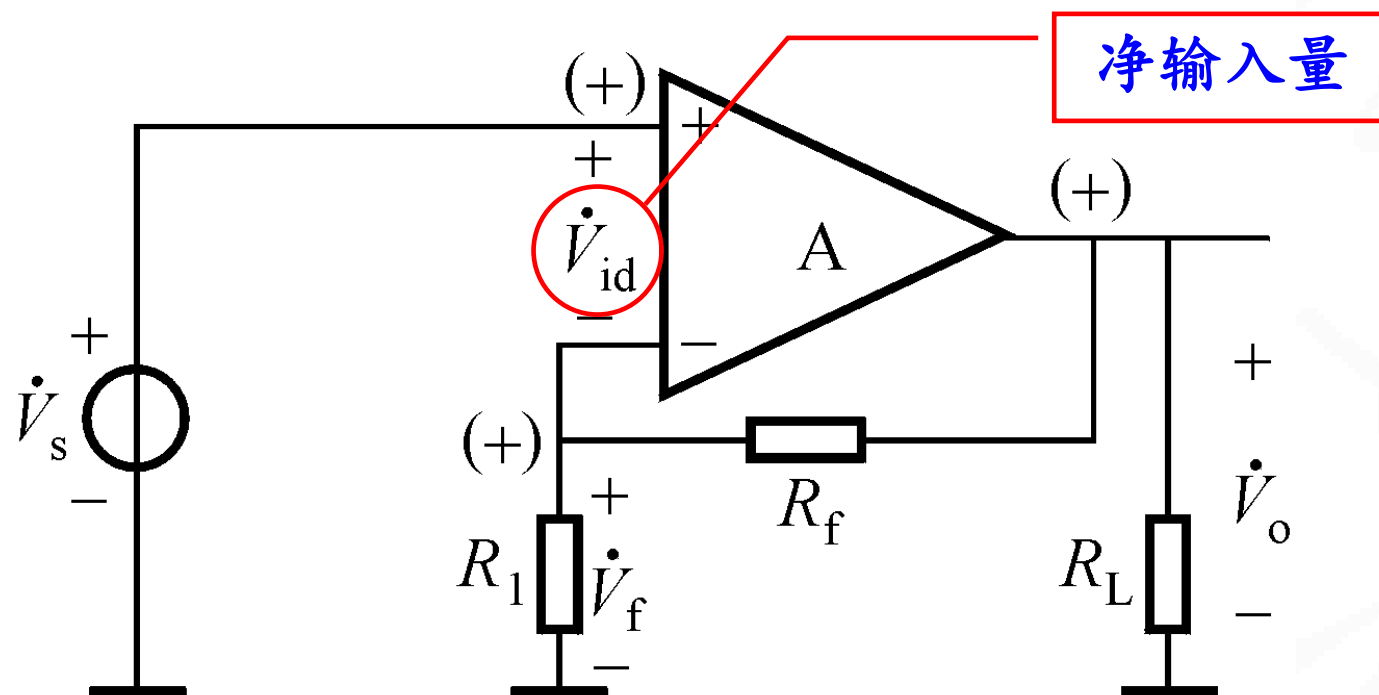
### 三、反馈极性和组态的判别

#### ➤ 反馈极性的判别：瞬时极性法

- ① 先假定输入量的瞬时极性为正极性；
- ② 根据放大电路各级的组态逐级推出电路中各点的瞬时极性，直至推出反馈信号的瞬时极性；
- ③ 最后在输入回路进行比较综合，判断引入反馈后净输入量如何变化。

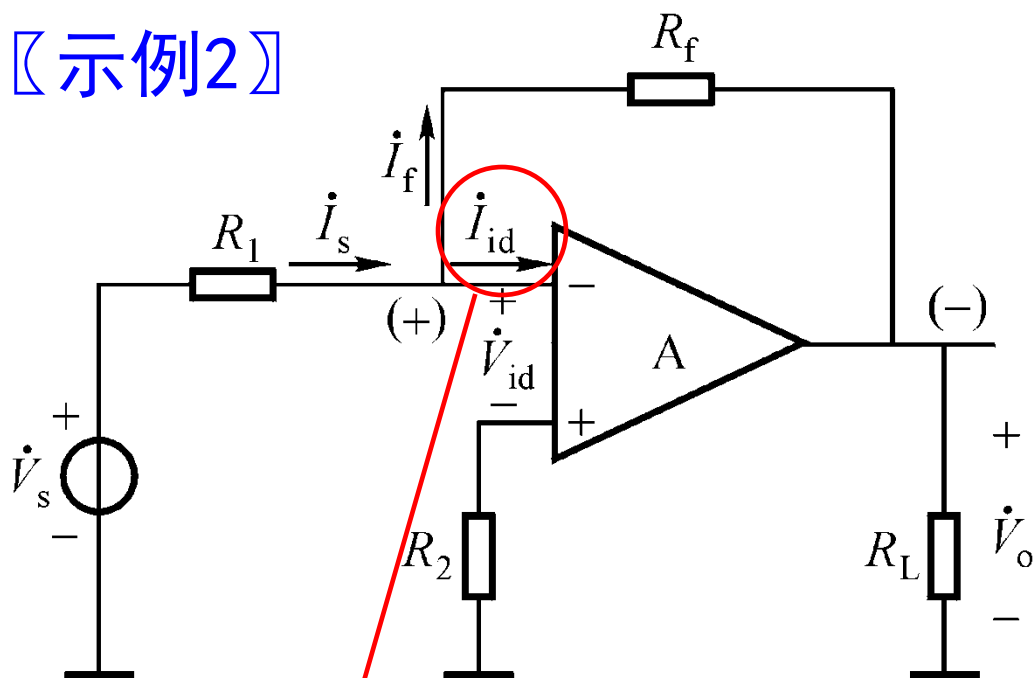


## 【示例1】



负反馈

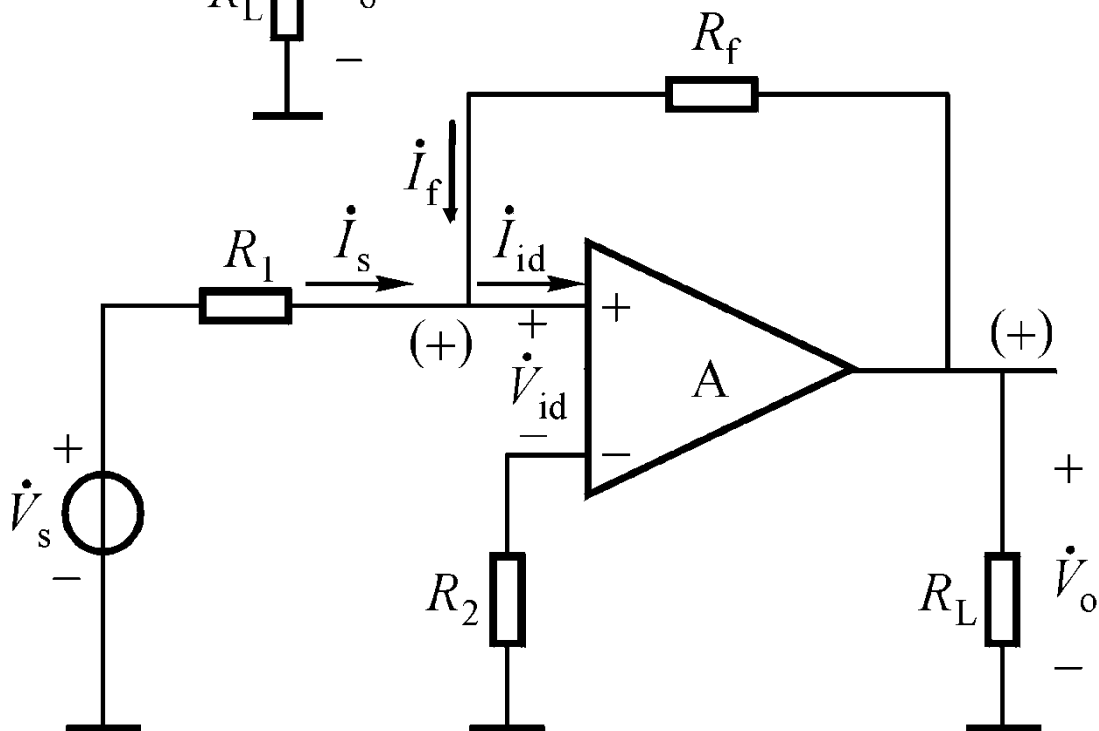
## 【示例2】



负反馈

净输入量

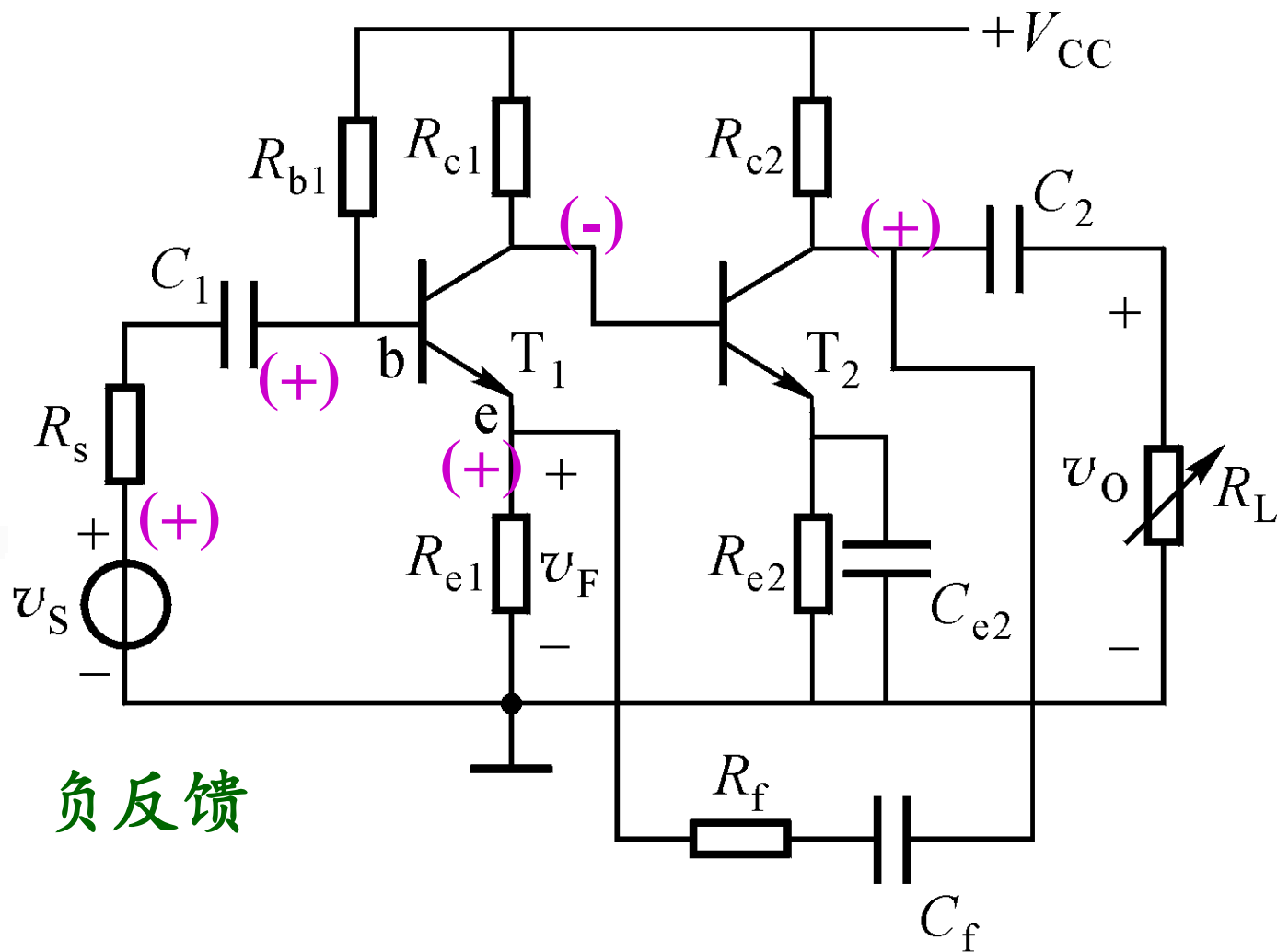
## 【示例3】



正反馈

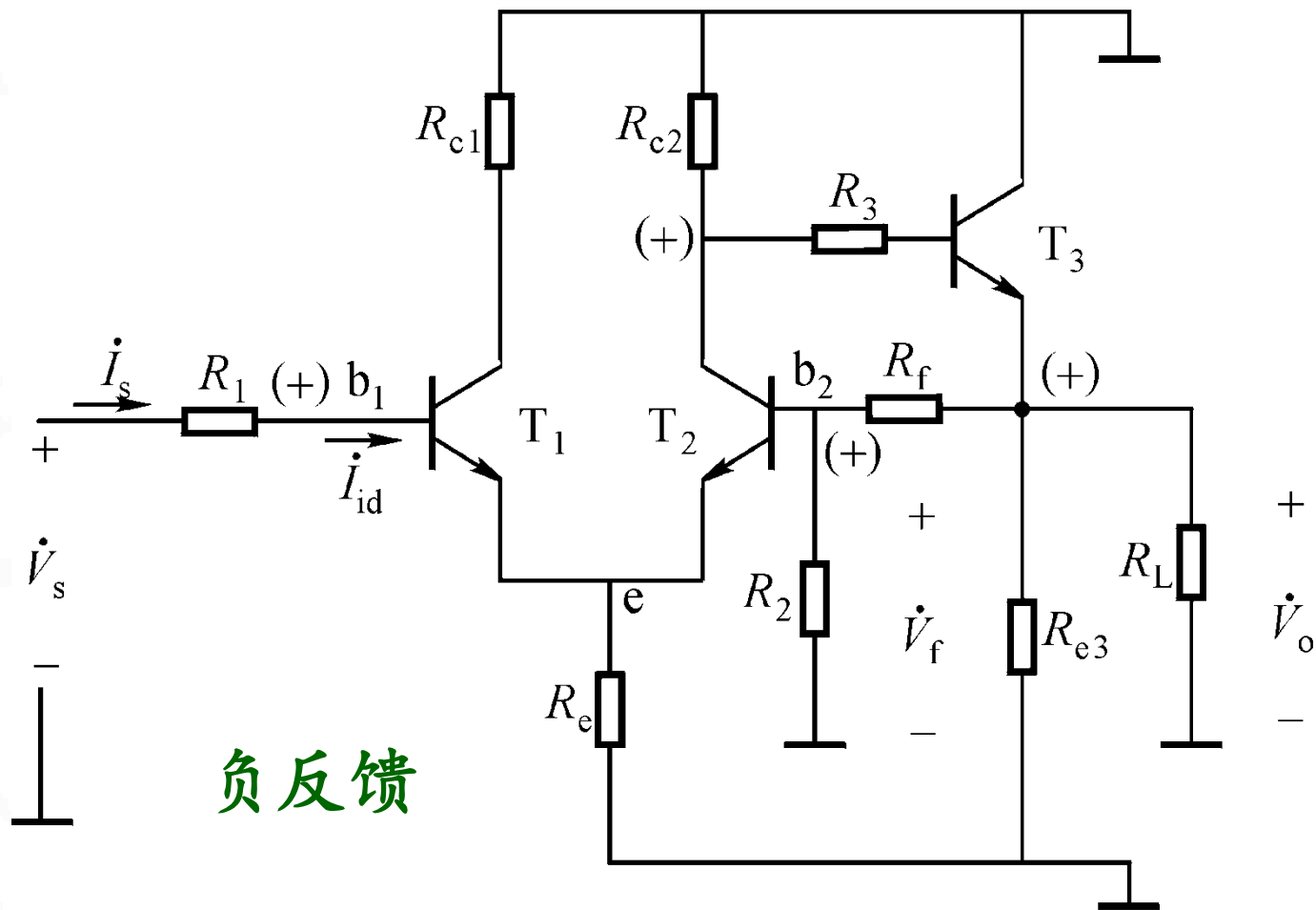


## 【示例4】分立元件构成的反馈电路



三极管的净输入量是发射结电压或基极电流。

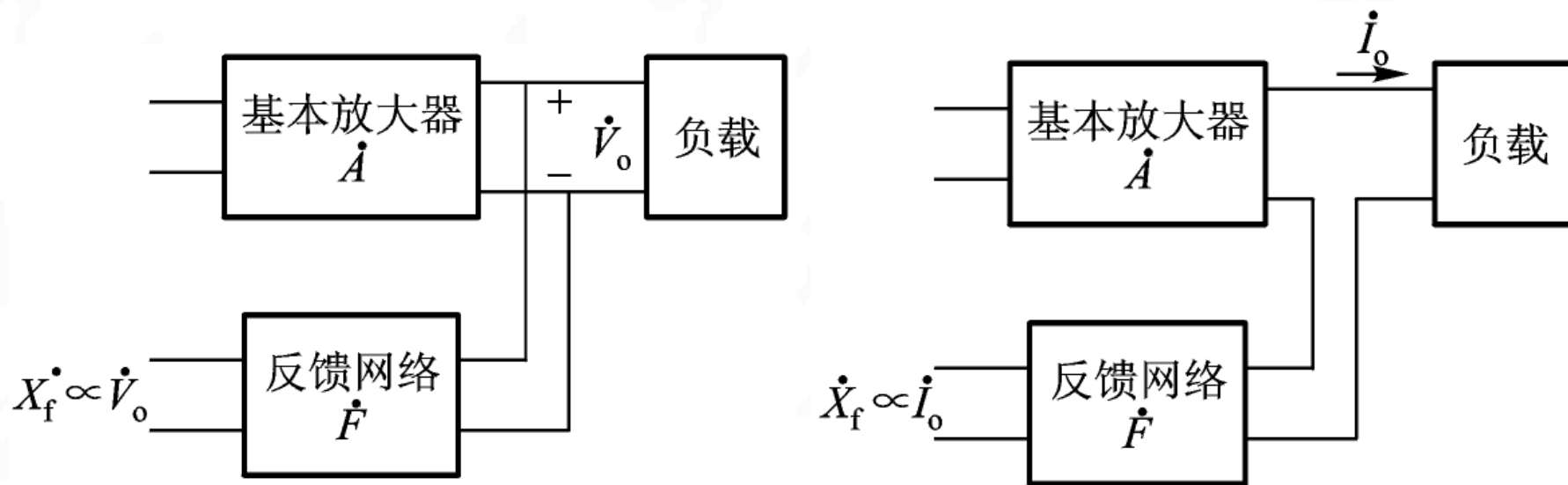
### 【示例5】差放电路构成的反馈电路



差分放大电路的净输入量是差模输入电压或基极输入电流。

## ➤ 电压反馈、电流反馈的判别

**方法1：**根据输出回路对电压或电流的取样方式确定。



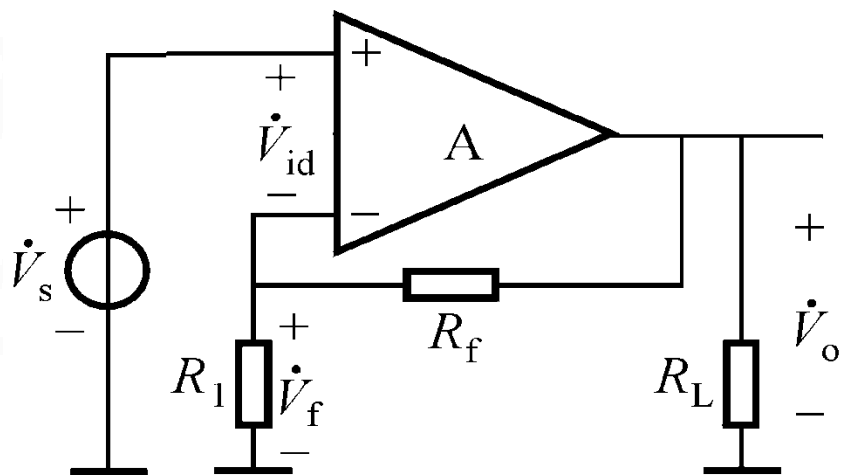
✧ 基本放大器、负载、反馈网络三者并联，为电压反馈；

✧ 三者串联为电流反馈。

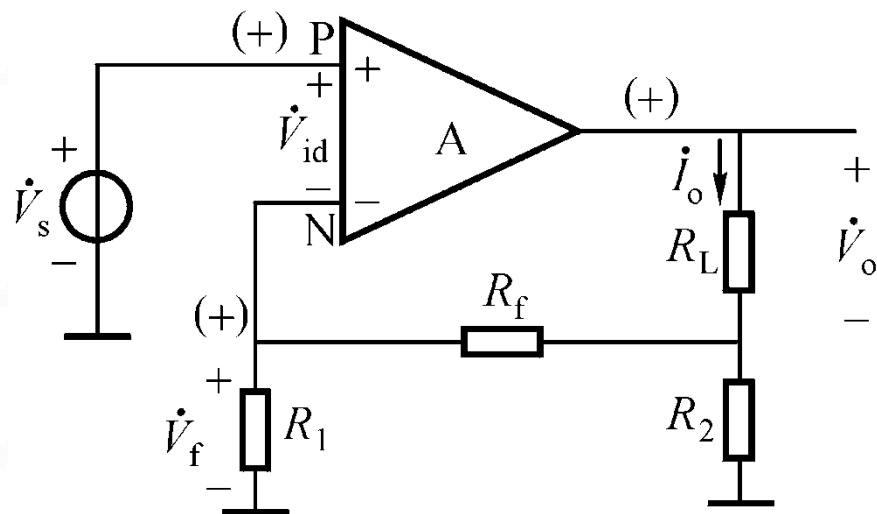
## 方法2：根据反馈表达式

- ✧ 若反馈量可以表示为与输出电压成正比（表达式中不含负载 $R_L$ ），则为**电压反馈**。
- ✧ 若反馈量可以表示为与输出电流成正比（表达式中不含负载 $R_L$ ），则为**电流反馈**。

### 【示例】



电压反馈：  $\dot{X}_f = F \cdot \dot{V}_o$

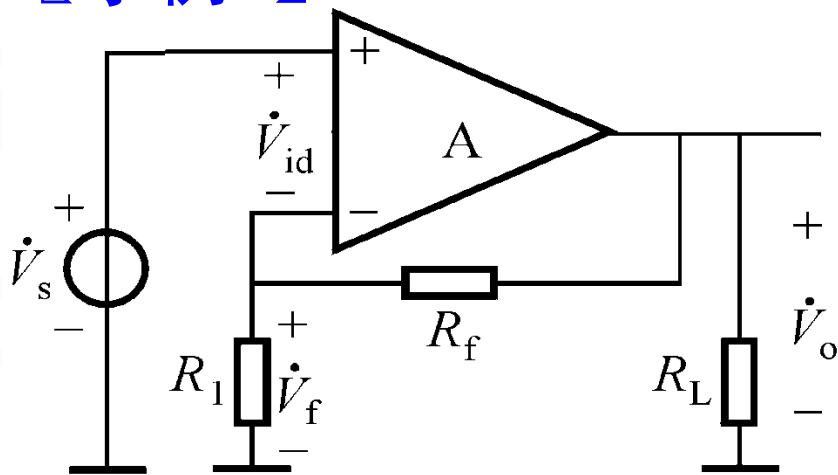


电流反馈：  $\dot{X}_f = F \cdot \dot{I}_o$

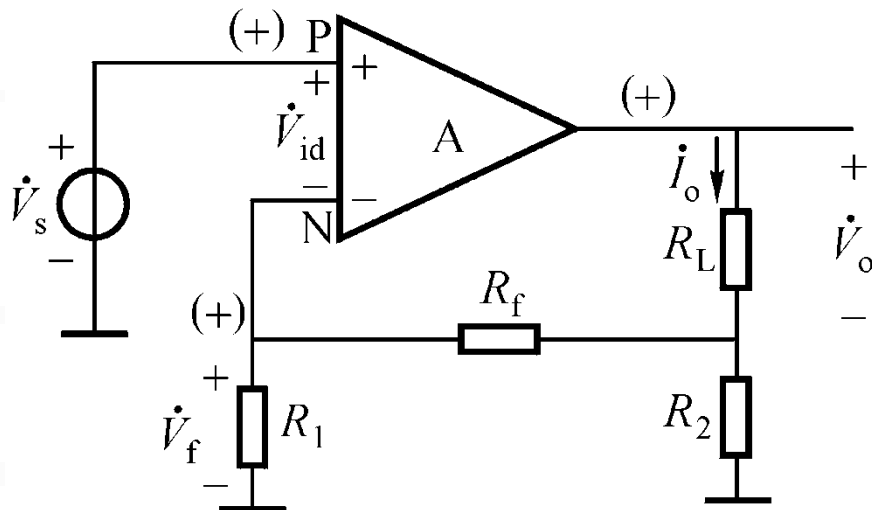
### 方法3：推论（适用于有公共地时）

- ✧ 若负载与反馈从放大器件的**同一输出端**接出，则为**电压反馈**。
- ✧ 若负载与反馈从放大器件的**不同输出端**接出，或负载没有直接接地，则为**电流反馈**。

#### 【示例1】



电压反馈



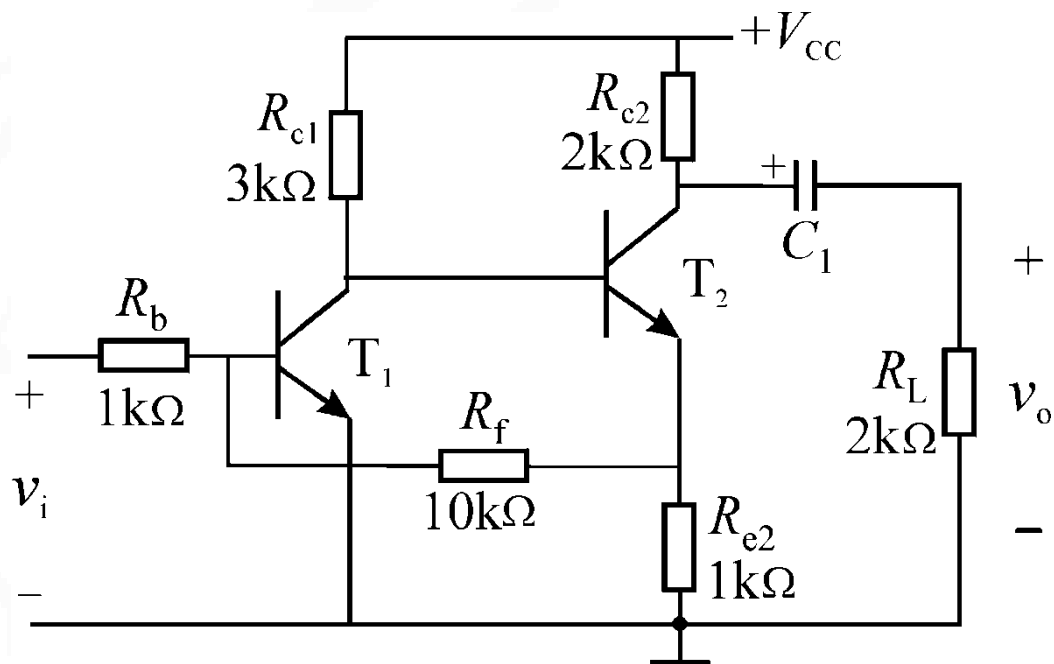
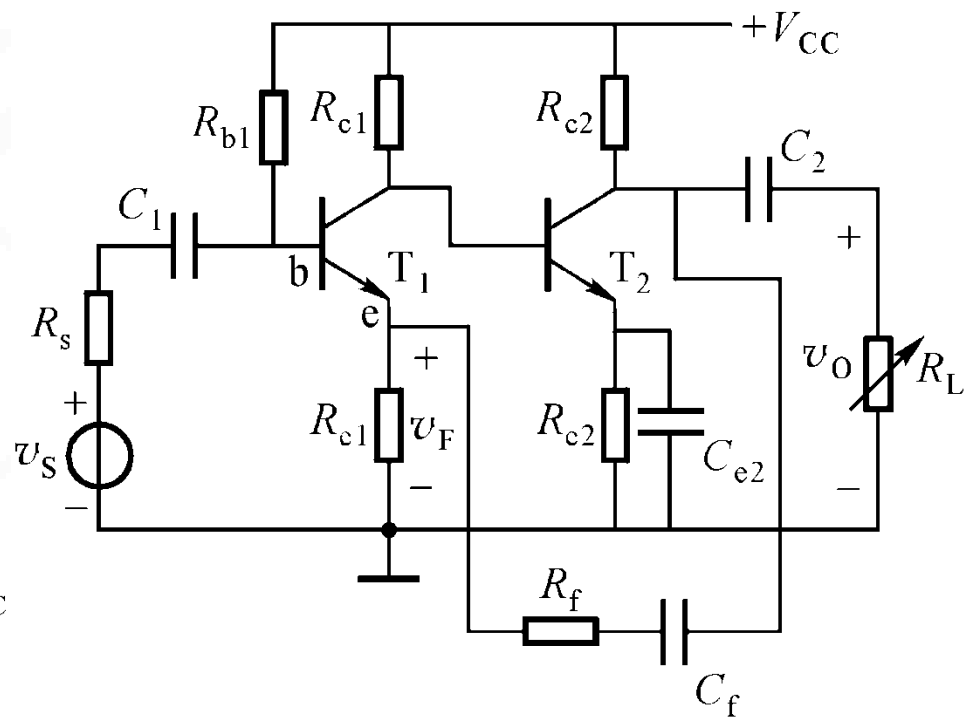
电流反馈





## 【示例2】分立元件构成的反馈电路

电压反馈

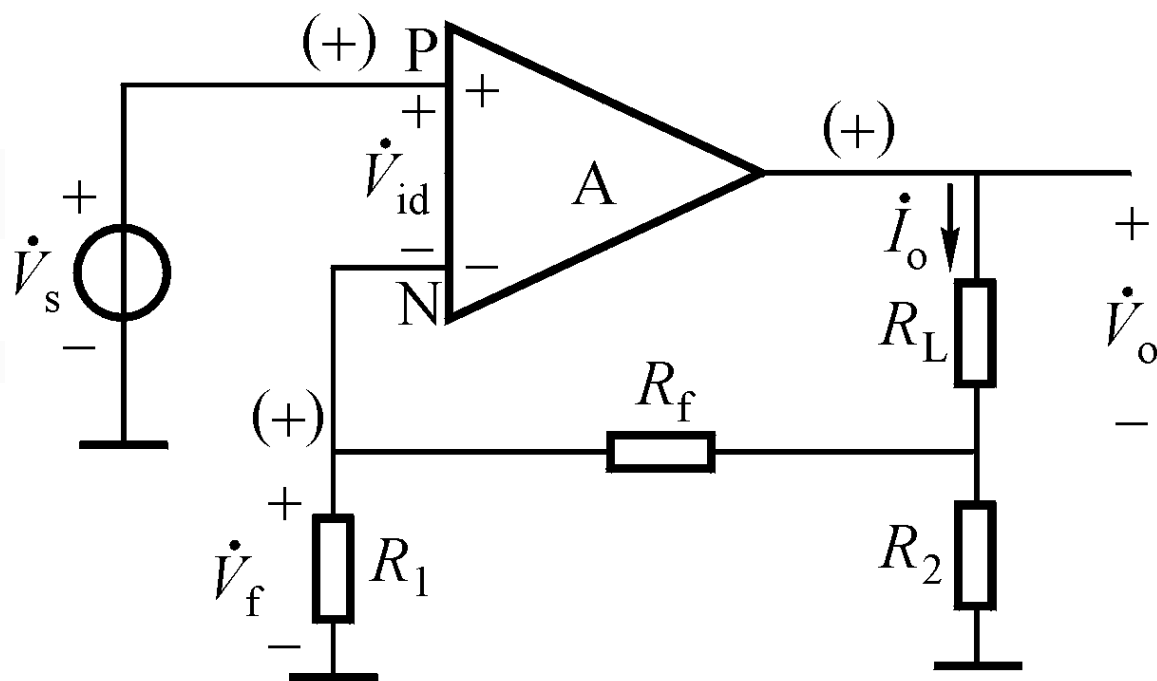


电流反馈

## 方法4：推论（负载短路法）

- ✧ 将放大电路的负载短路 ( $R_L=0$ )，若输入回路中仍然存在反馈量 ( $X_f \neq 0$ )，则为电流反馈；
- ✧ 若输入回路中不存在反馈 ( $X_f=0$ )，则为电压反馈。

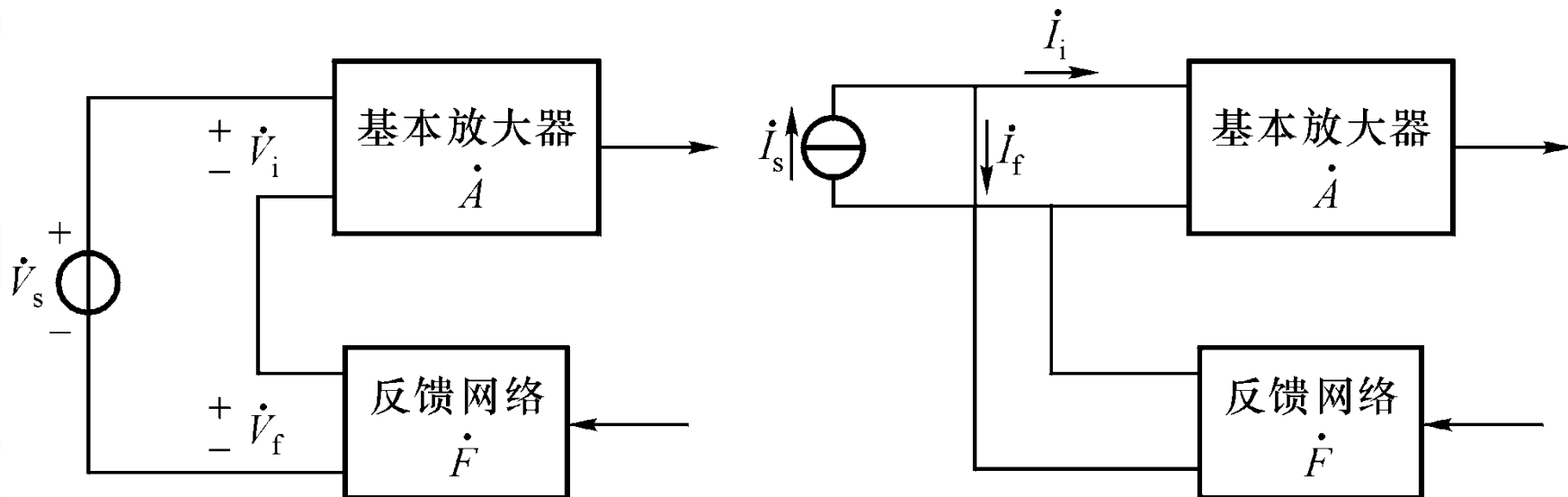
【示例】



$R_L=0$ 时，反馈仍然存在，所以是电流反馈。

## ➤ 串联反馈、并联反馈的判别

**方法1：** 根据输入回路的连接方式确定。

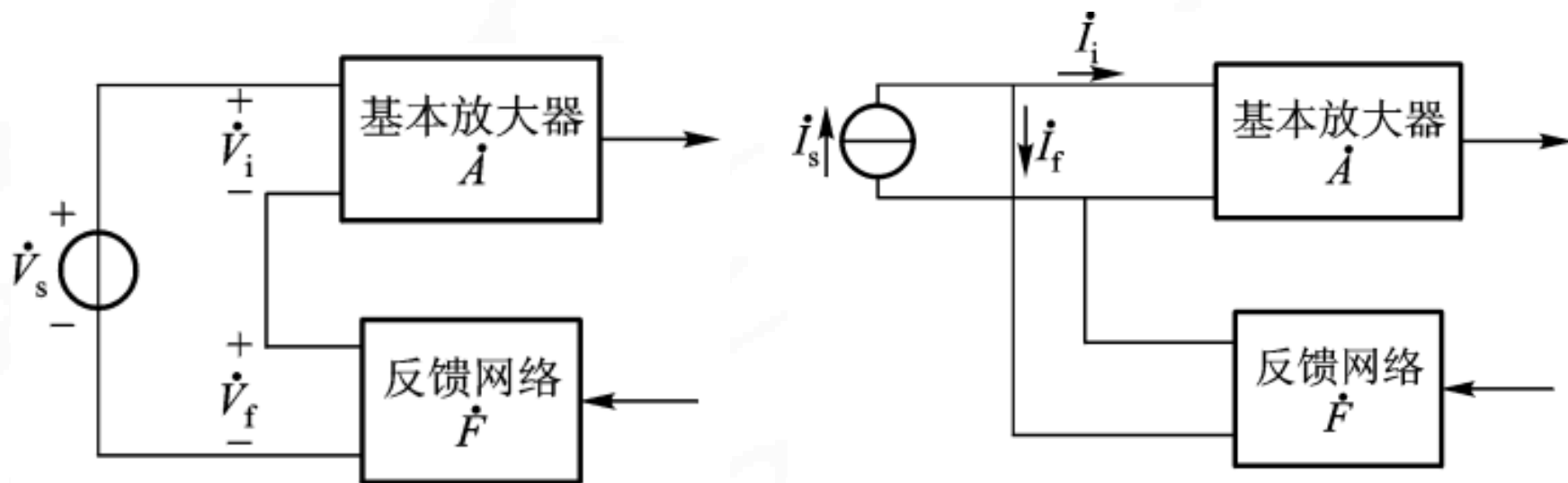


- ✧ 基本放大器、信号源、反馈网络三者串联，为**串联反馈**；
- ✧ 三者并联为**并联反馈**。

## 方法2：根据求和表达式

✧ 若以**电压量**进行比较求和，则为**串联反馈**。

✧ 若以**电流量**进行比较求和，则为**并联反馈**。



串联反馈

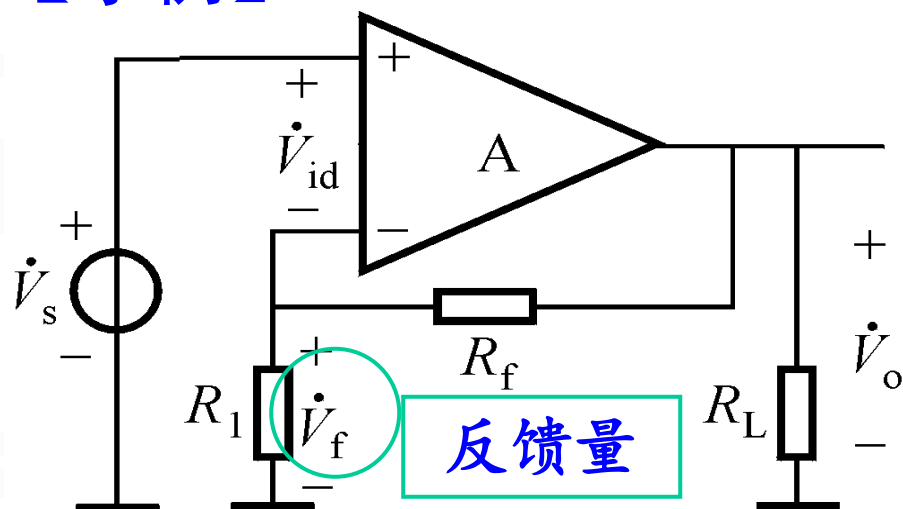
$$\dot{V}_i = \dot{V}_s - \dot{V}_f$$

并联反馈

$$\dot{I}_i = \dot{I}_s - \dot{I}_f$$



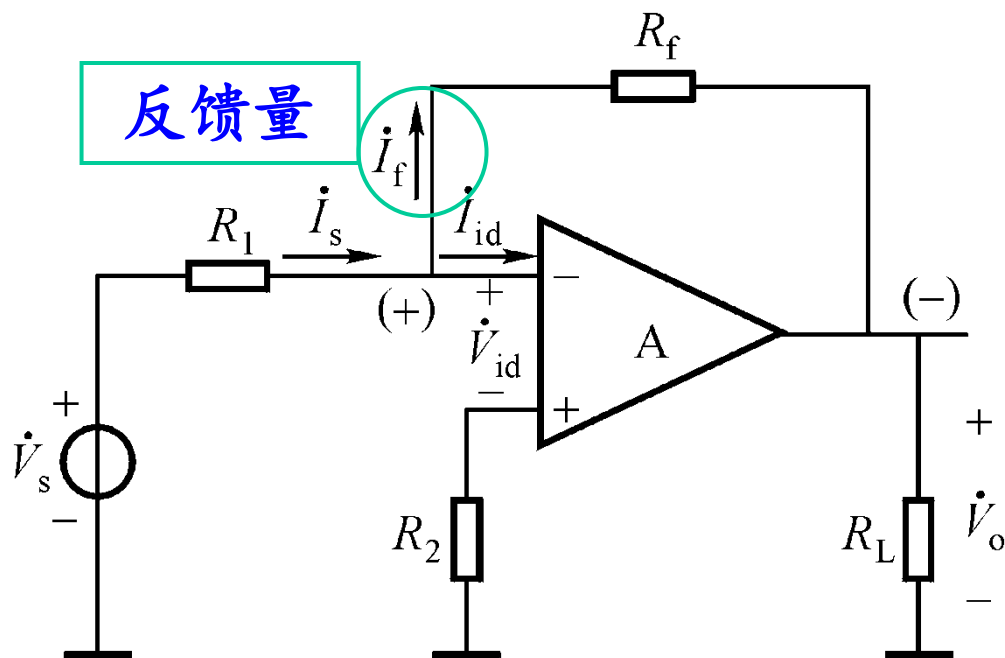
## 【示例】



输入回路串联

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{id} + \dot{V}_f$$

串联反馈



输入回路并联

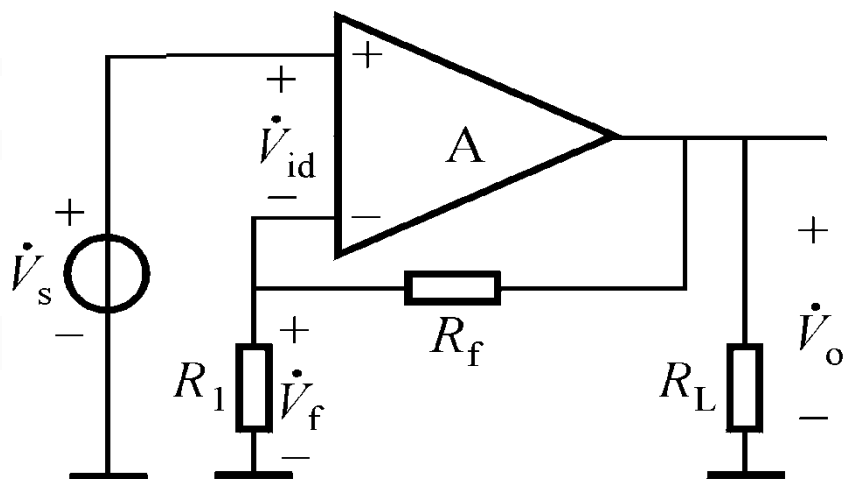
$$\dot{I}_s = \dot{I}_{id} + \dot{I}_f$$

并联反馈

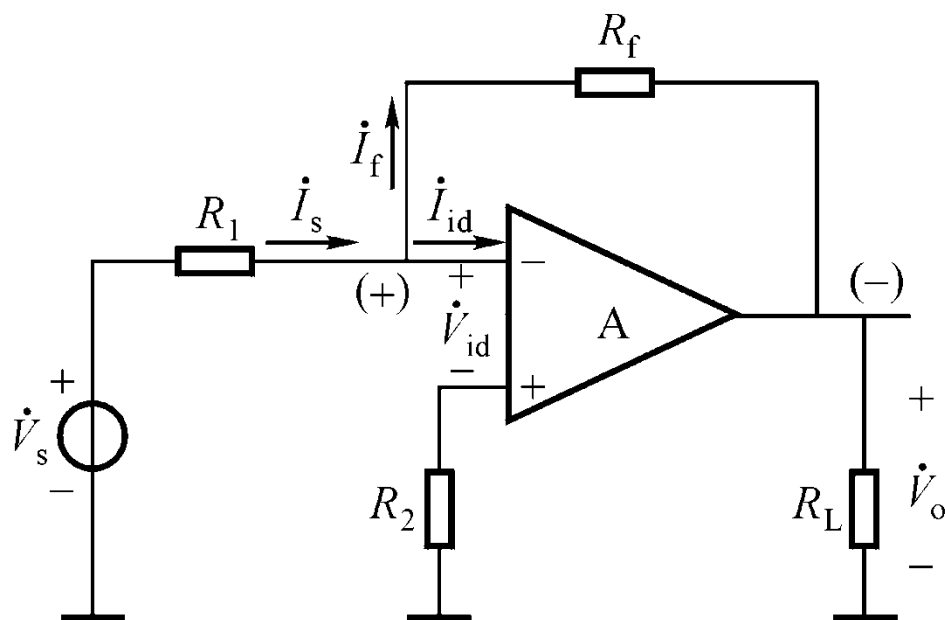
## 方法3: 推论 (适用于有公共地时)

- ✧ 若输入信号与反馈接到放大器件的同一输入端, 则为**并联反馈**。
- ✧ 若输入信号与反馈接到放大器件的不同输入端, 则为**串联反馈**。

### 【示例1】



串联反馈

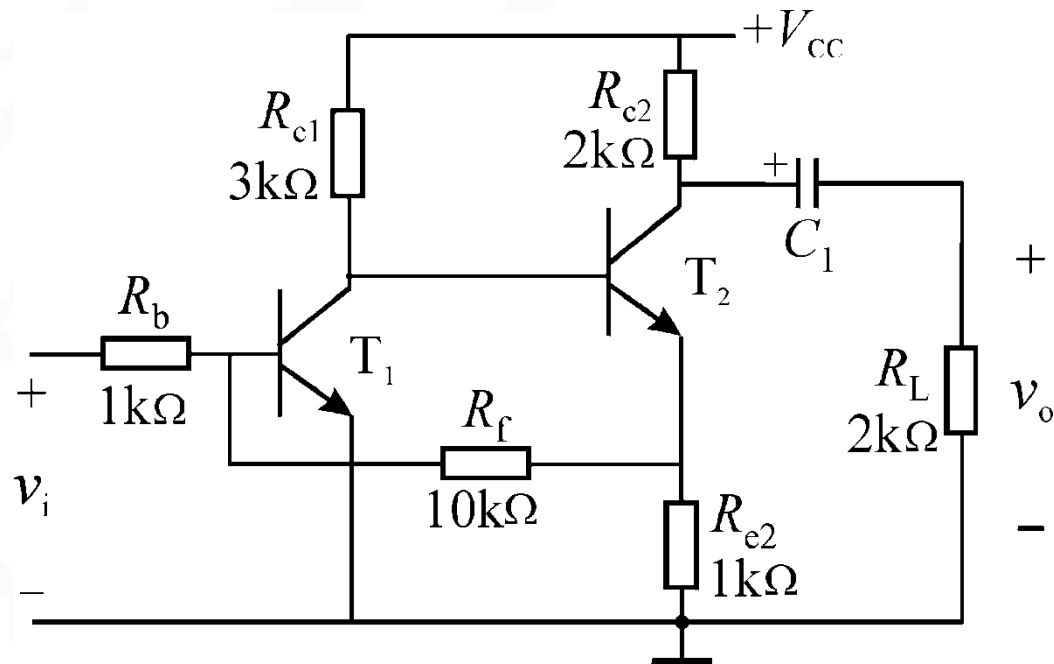
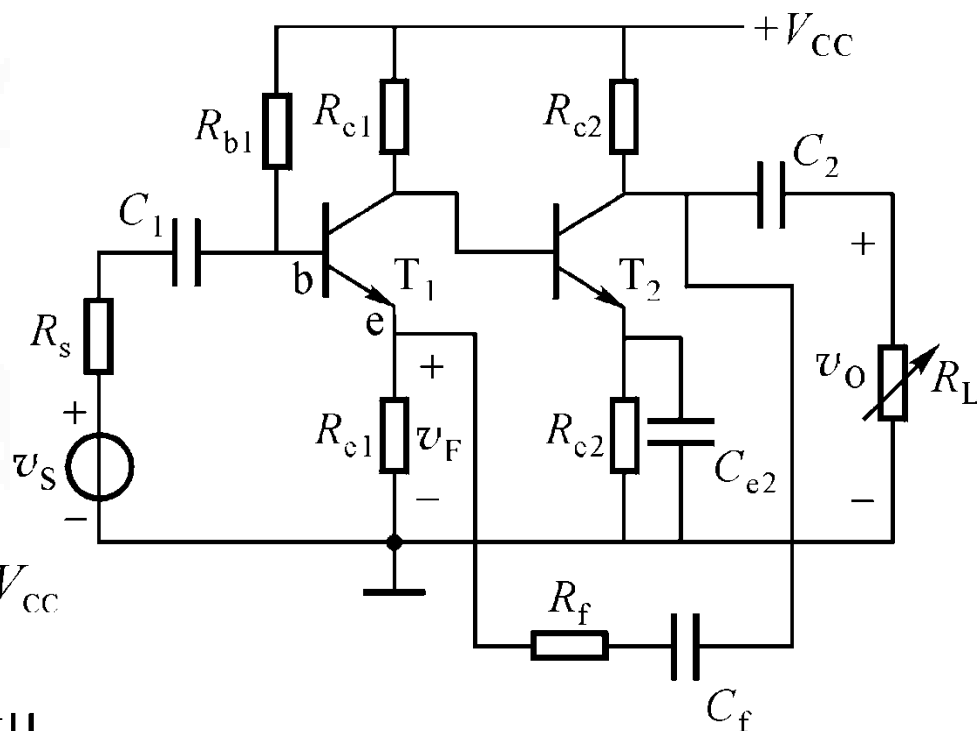


并联反馈



## 【示例2】分立元件构成的反馈电路

串联反馈

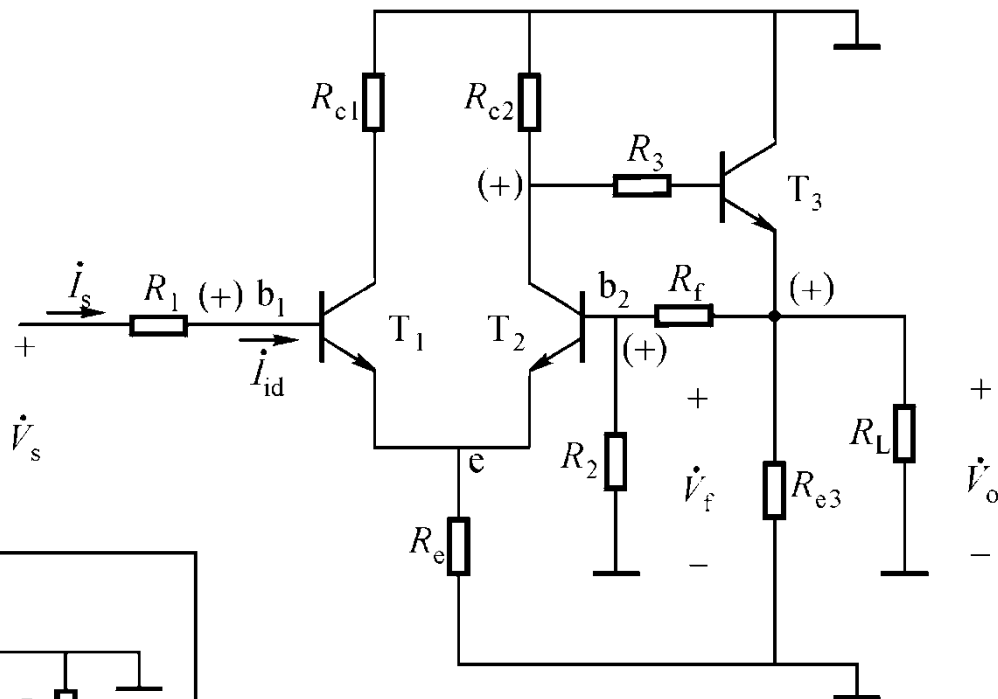
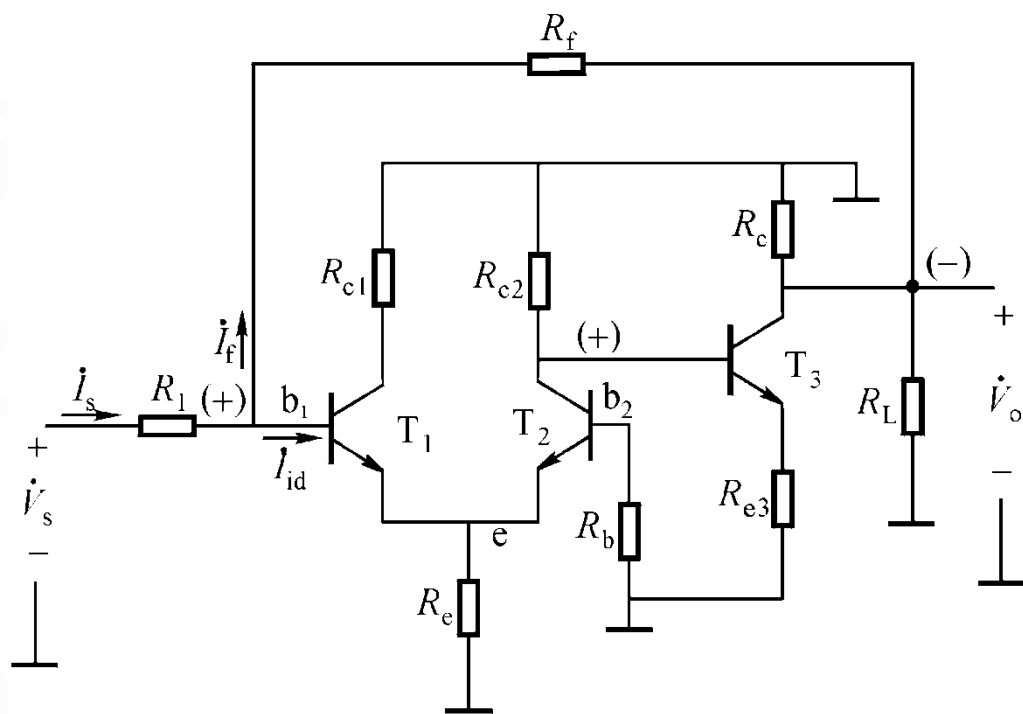


并联反馈



## 【示例3】差放电路构成的反馈电路

串联反馈

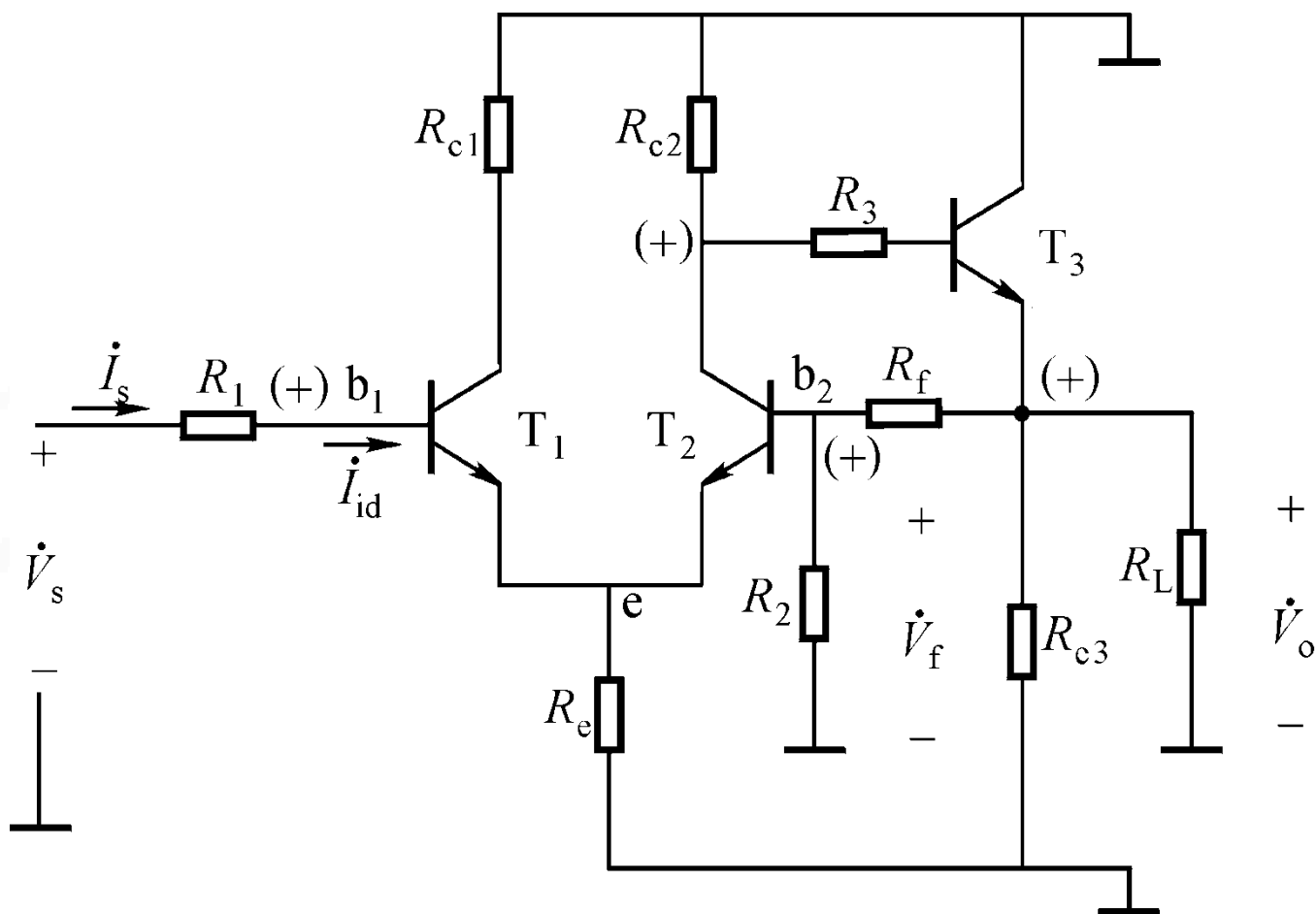


并联反馈

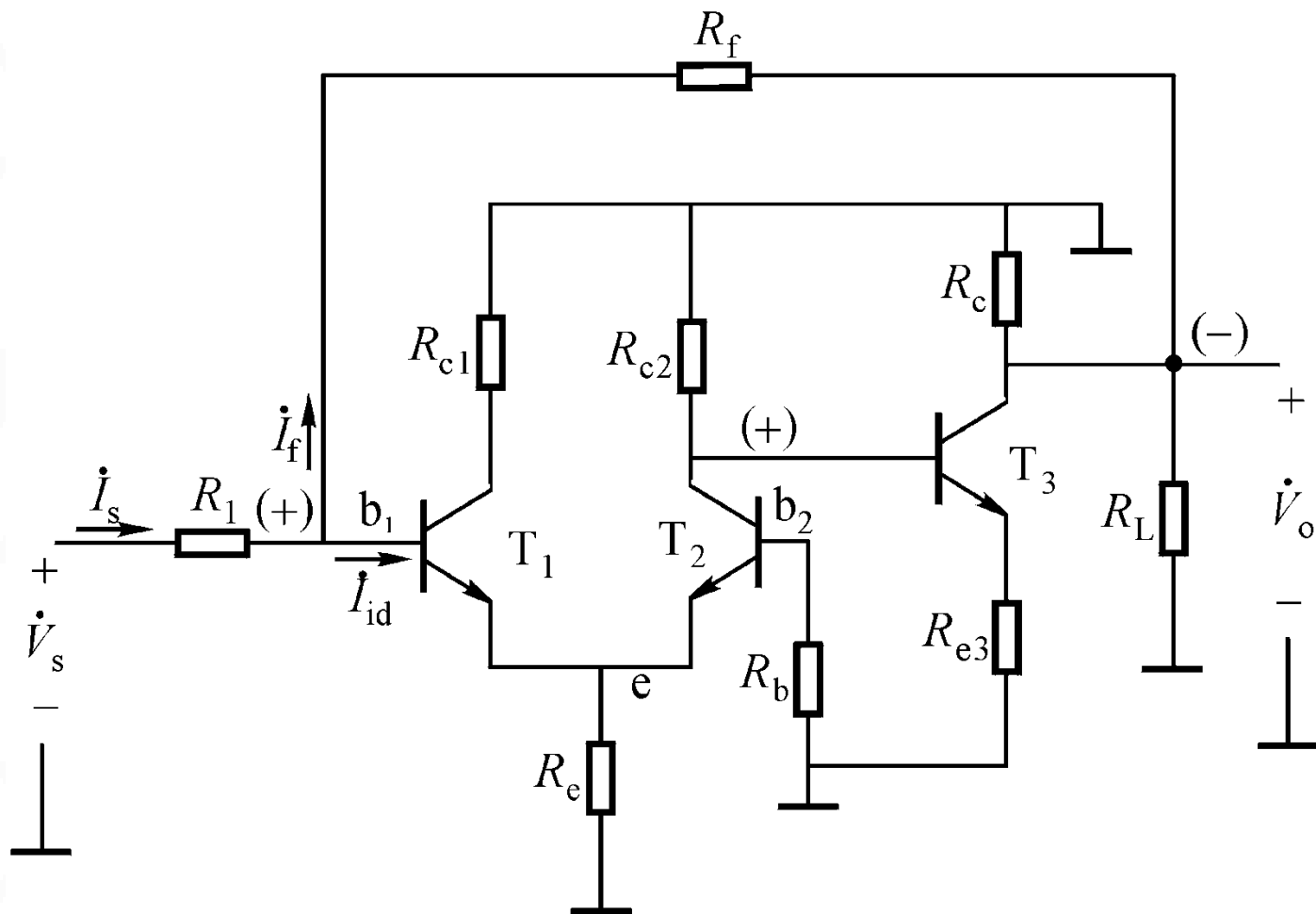




【例1】 分析反馈组态，指出反馈量和净输入量。



【解】 电压串联负反馈



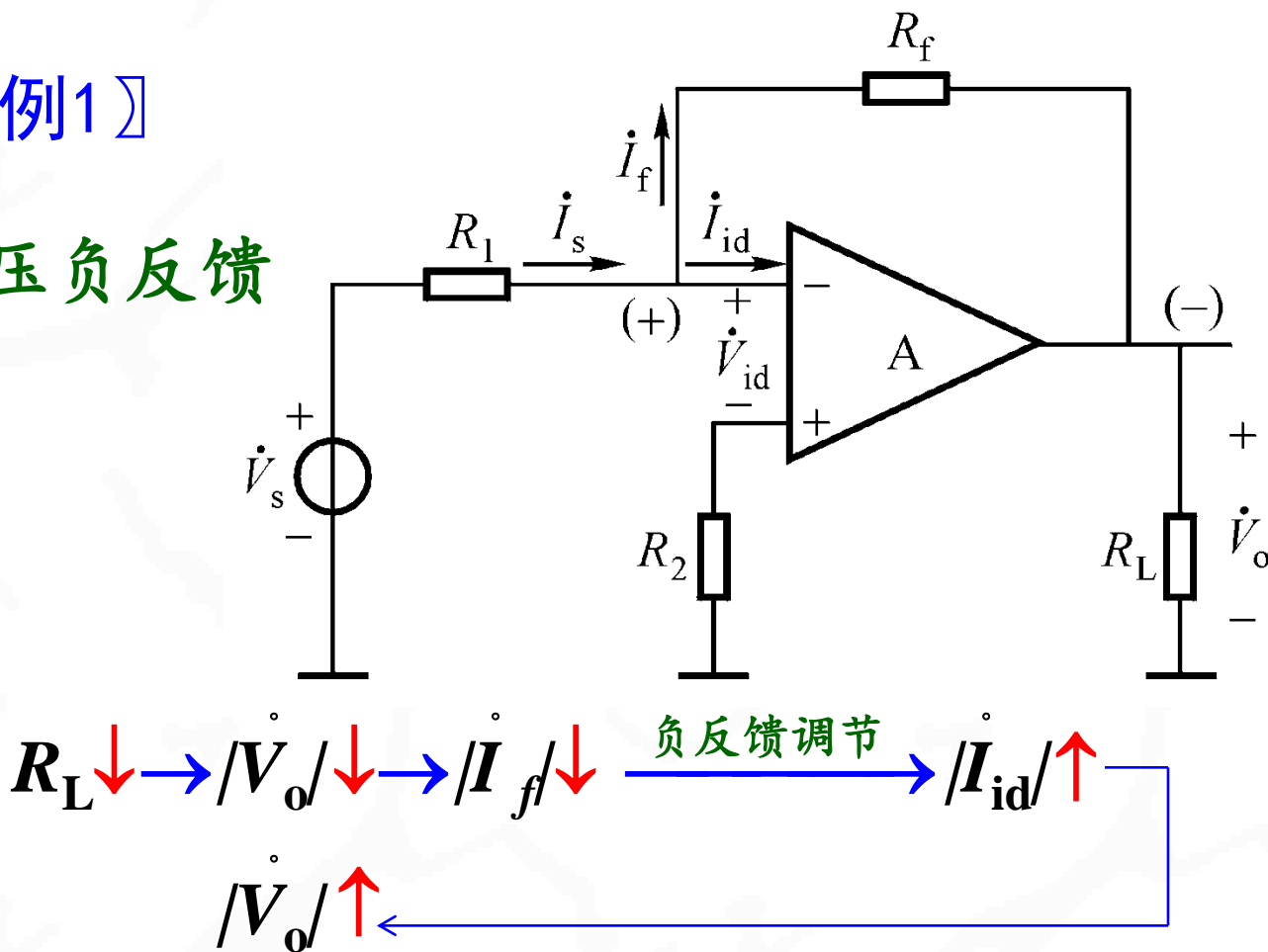
### 【解】 电压并联负反馈

## 四、负反馈稳定输出的原理

- ✧ 电压负反馈的作用是稳定输出电压；
- ✧ 电流负反馈的作用是稳定输出电流。

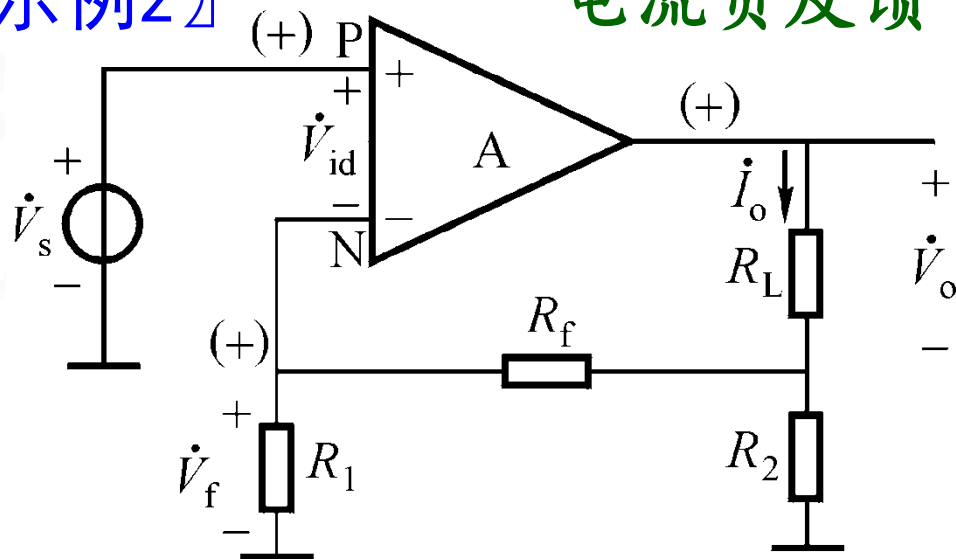
### 【示例1】

#### 电压负反馈



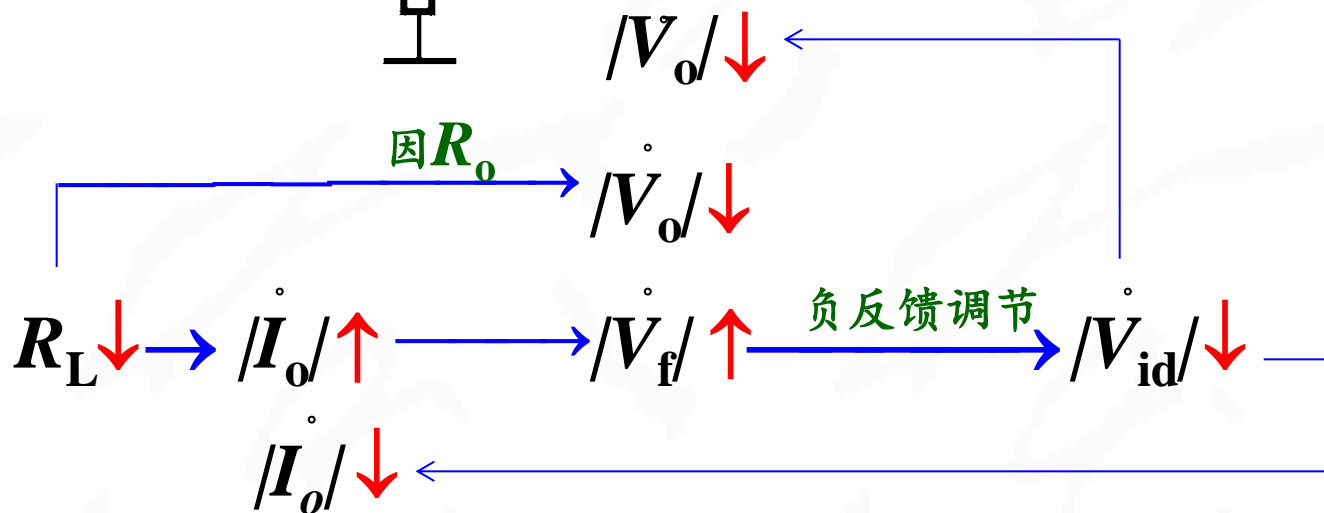
## 【示例2】

## 电流负反馈



若温度变化引起输出波动，则电压负反馈与电流负反馈的效果是否一样？

结果是输出电流趋于稳定，而输出电压反而更加减小。

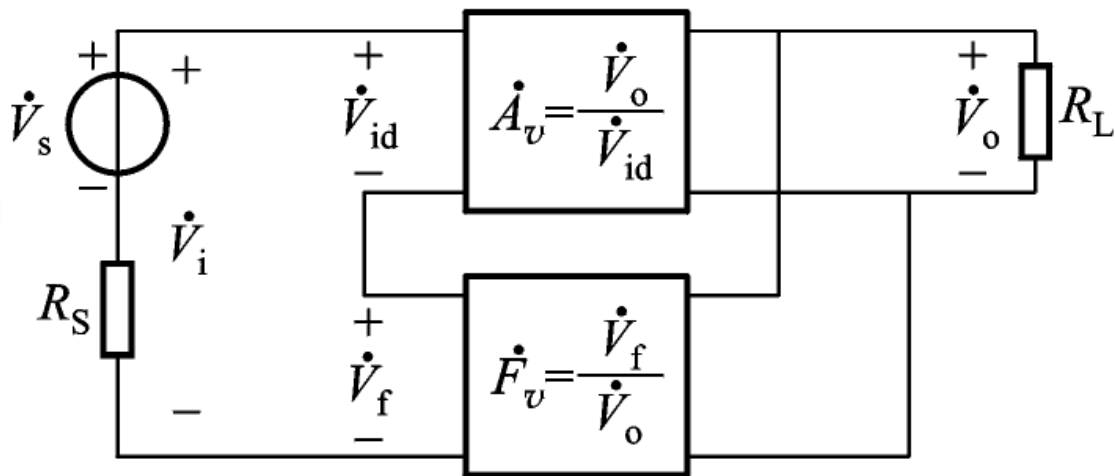


**结论：**电压负反馈与电流负反馈在负载  $R_L$  变化时其效果完全相反的。

## 五、不同组态下参数的物理意义

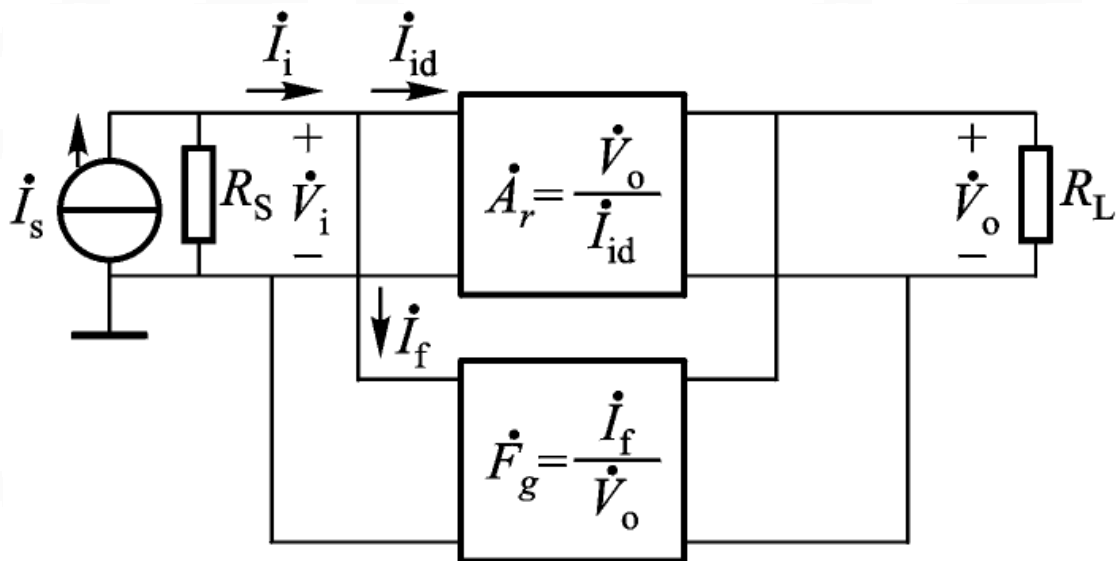
### ◇ 电压串联负反馈

- 开环电压增益
- 电压反馈系数
- 闭环电压增益



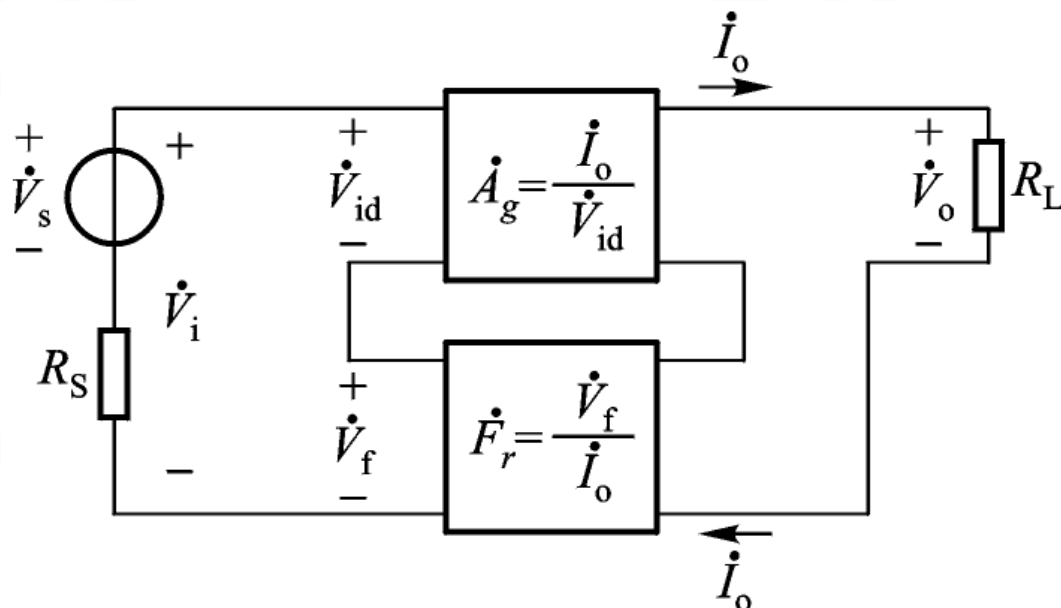
### ◇ 电压并联负反馈

- 开环电阻增益
- 互导反馈系数
- 闭环互阻增益



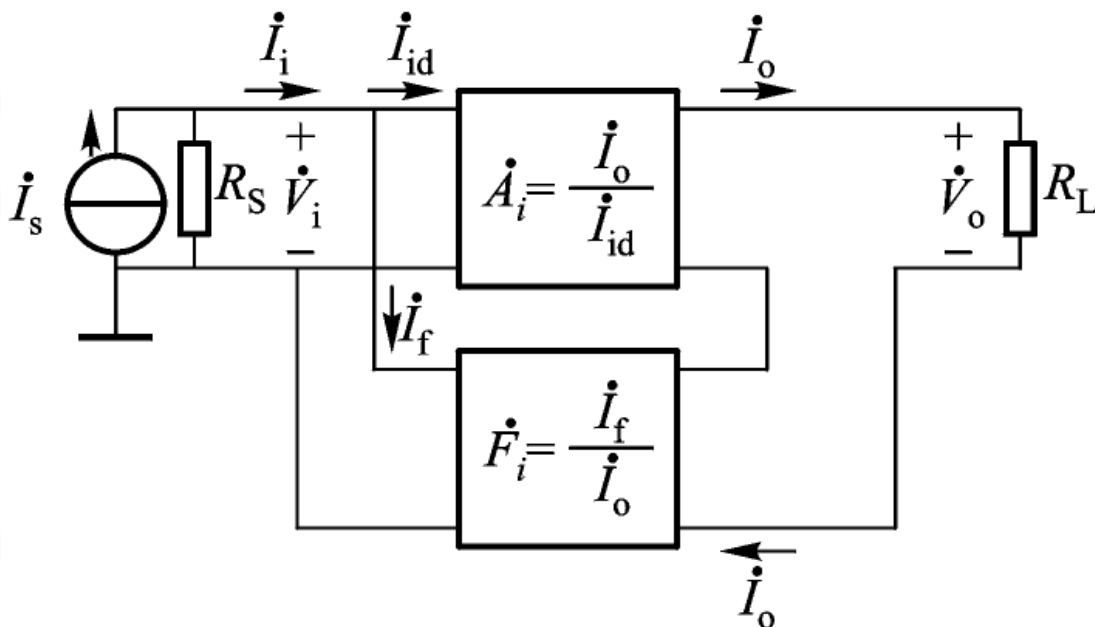
## ◇ 电流串联负反馈

- 开环电导增益
- 互阻反馈系数
- 闭环互导增益



## ◇ 电流并联负反馈

- 开环电流增益
- 电流反馈系数
- 闭环电流增益



## ➤ 小结：不同组态下的参数含义

反馈组态	开环增益	物理意义	反馈系数	物理意义
电压串联	$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$	电压增益	$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o}$	电压传输比
电压并联	$\dot{A}_r = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i}$	电阻增益	$\dot{F}_g = \frac{\dot{I}_f}{\dot{V}_o}$	互导传输比
电流串联	$\dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i}$	电导增益	$\dot{F}_r = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o}$	互阻传输比
电流并联	$\dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	电流增益	$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	电流传输比



## 2.2 负反馈对放大电路性能的影响

负反馈虽使闭环增益下降，但以此为代价，却获得了其他许多性能的改善。

### 一、提高闭环增益的稳定性

当环境温度等因素发生变化时，放大电路的增益也会改变。

放大电路稳定的程度可用增益的相对变化量来衡量，若相对变化量减小，则稳定性提高。

为简单计，设放大电路工作在中频段， $A$ 和 $F$ 都为实数。





$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1 + AF} - \frac{AF}{(1 + AF)^2} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{A_f} \cdot \frac{dA}{(1 + AF)^2} = \frac{dA}{A} \cdot \frac{1}{1 + AF}$$

放大电路引入了负反馈后，增益的相对变化量  $dA_f/A_f$  是无反馈时的  $1/(1+AF)$ 。

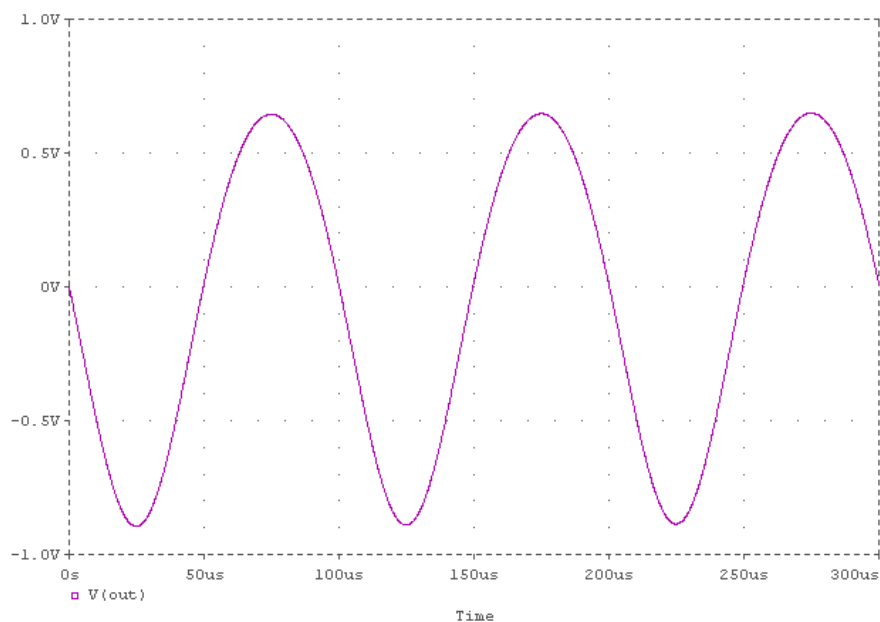
- ✧ 负反馈只能减小由于开环增益变化而引起的闭环增益的变化。
- ✧ 不同类型的负反馈所能稳定的增益也不同。

## 二、改善放大电路的非线性

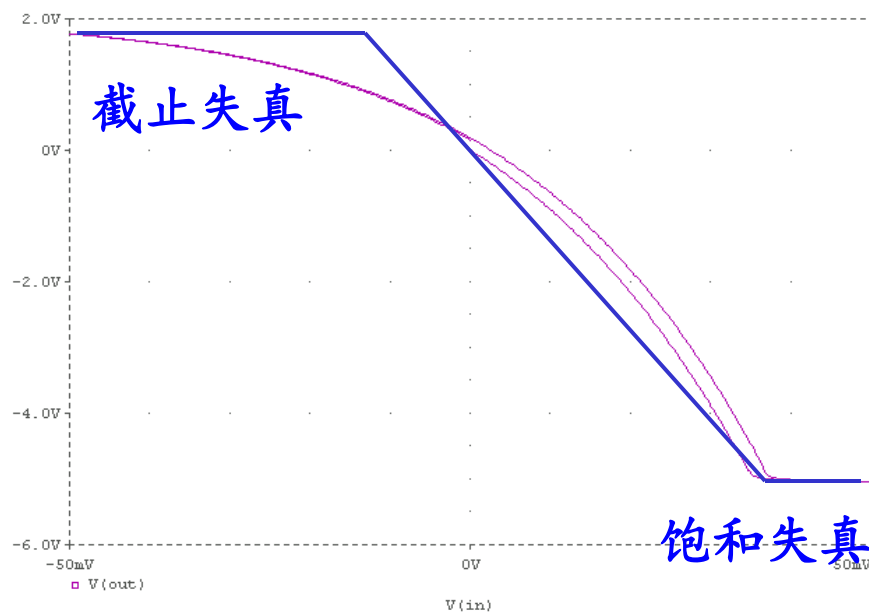
✧ 放大电路的非线性失真包括：

- 由于进入截止区、饱和区引起的失真
- 由于放大器件本身  $\beta$  非线性引起的失真

### 【示例】 CE放大电路实验



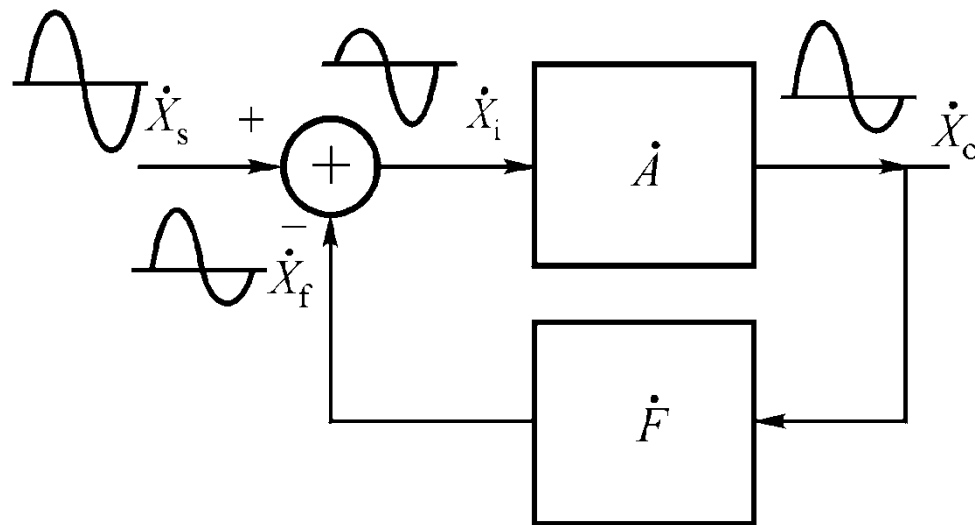
$v_o$ 波形的失真( $v_i=10mV$ 时)



传输特性( $v_i=50mV$ 时)

## ✧ 引入负反馈可以减小非线性失真。

- 设正半周略大于负半周，则经负反馈后，反馈信号正半周也大，使净输入信号正半周略小。



- 引入负反馈后，增益减小，为了保持相同幅度的输出，应加大输入信号。

## ✧ 理论可以证明（见教材）：

放大电路引入了负反馈后，在相同的输出幅度下，非线性失真减小到原来的  $1/(1+AF)$ 。



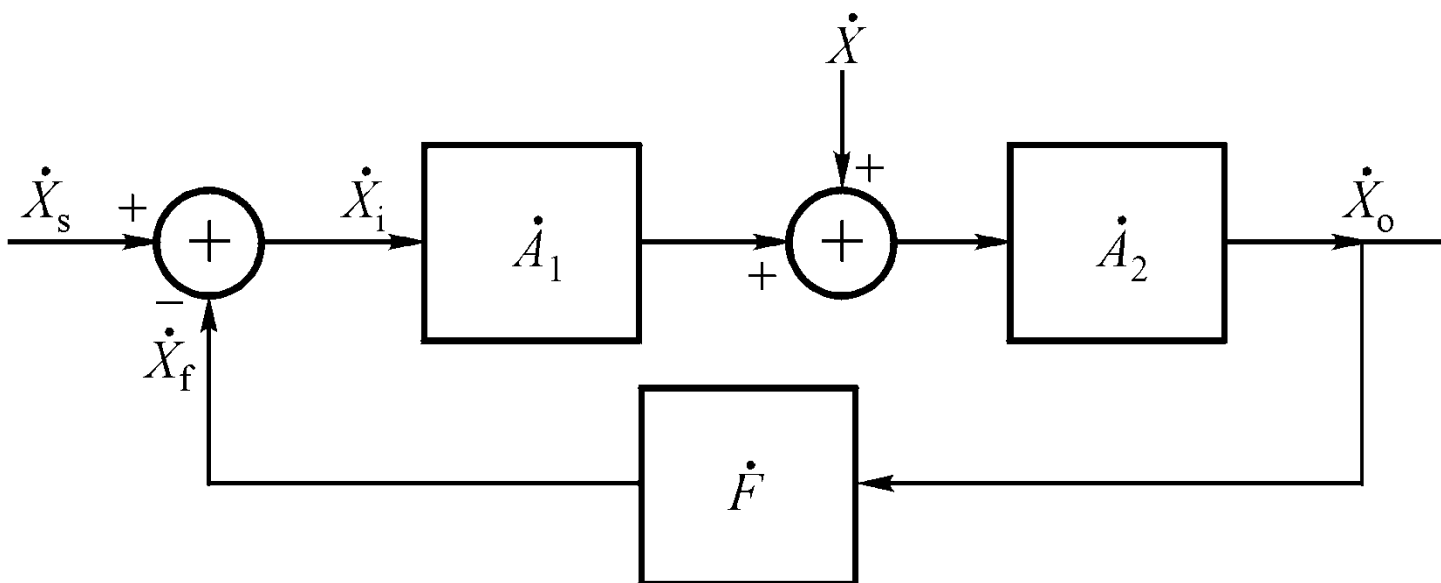
### 三、抑制放大电路内部的温漂、噪声和干扰

✧ 噪声和干扰包括：

- 电子器件的内部噪声：载流子的无规则热运动
- 传导干扰：通过电源线进入电路
- 辐射干扰：通过电场耦合、磁场耦合进入

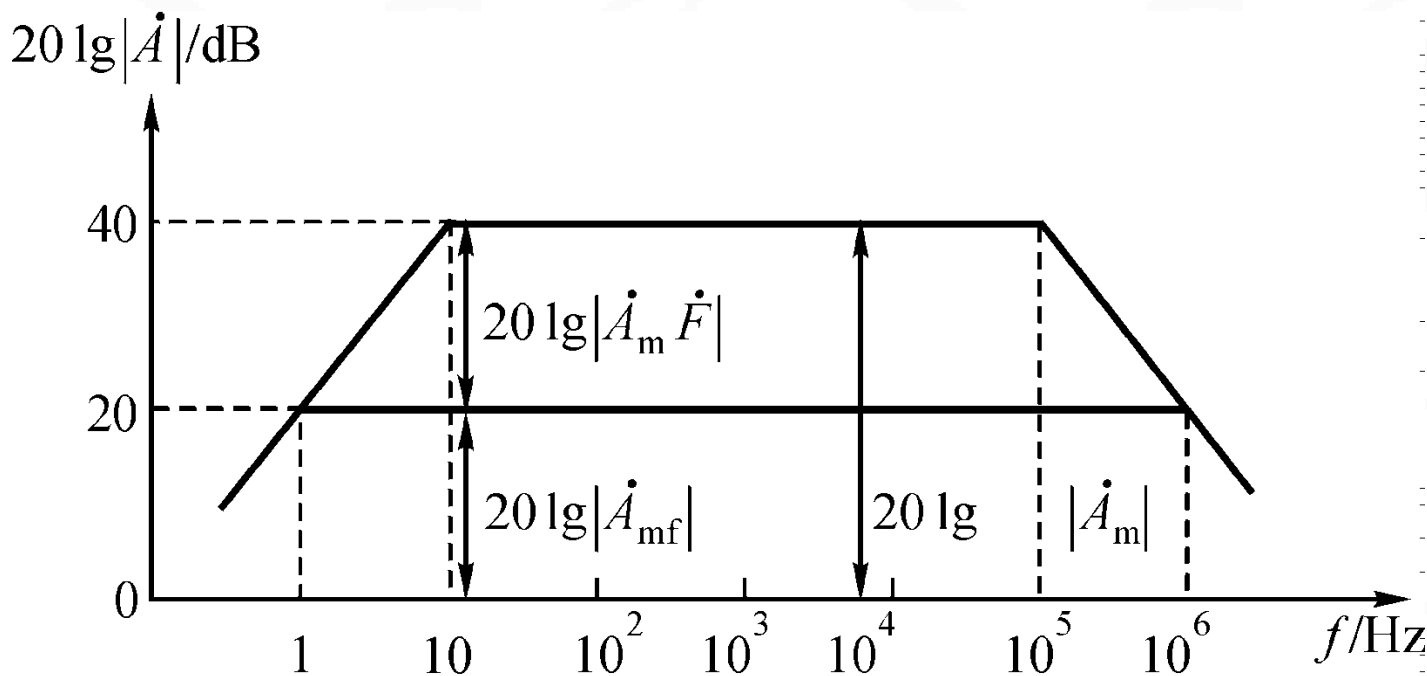
✧ 负反馈对噪声的抑制原理：

引入负反馈后，信号、干扰和噪声都将减少。为了弥补有用信号，必须加大输入信号，使信号与噪声的比值（简称**信噪比**）提高。



- ✧ 负反馈只能抑制反馈环路以内的温漂、噪声及干扰，反馈环路之外的噪声（如输入信号中的噪声）不起作用。
- ✧ 可以证明：引入负反馈后，干扰和噪声减小为原来的  $\mathbf{1/(1+AF)}$ 。

## 四、扩展通频带



✧ 可以证明：引入负反馈后，

$$f_{\text{Hf}} = (1 + A_m F) f_{\text{H}}$$

$$f_{\text{Lf}} = f_{\text{L}} / (1 + A_m F)$$

- ✧ 可见放大器引入负反馈后，上限频率升高，下限频率降低，因而使放大电路的通频带 $BW_f$ 扩展。
- ✧ 扩展通频带也是运放线性放大时必须引入负反馈的原因之一。
- ✧ 增益带宽积近似为一常数：

$$A_{mf} \cdot BW_f \approx A_m \cdot BW$$

可见，对一定的放大电路来说，如要求高增益，则通频带必然较窄；反之，要扩展通频带，必须以牺牲增益为代价。



## 五、负反馈对输出电阻的影响

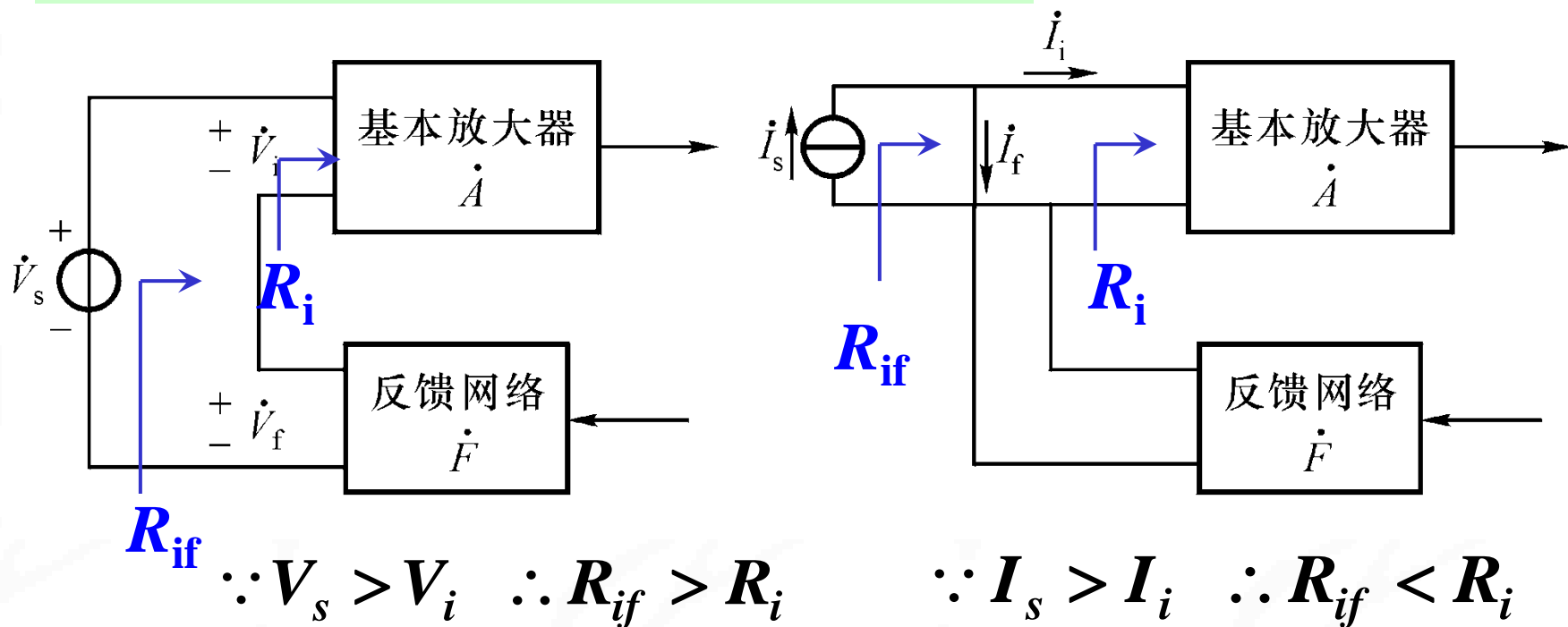
电压负反馈的结果是稳定输出电压，相当于输出电阻减小了。引入电压负反馈后，闭环输出电阻  $R_{of}$  为开环输出电阻  $R_o$  的  $1/(1+AF)$ 。在深度电压负反馈下， $R_{of} \approx 0$ （从取样点看进去）。

电流负反馈的结果是稳定输出电流，相当于输出电阻增大了。引入电流负反馈后，闭环输出电阻  $R_{of}$  为开环输出电阻  $R_o$  的  $(1+AF)$  倍。在深度电流负反馈下， $R_{of} \approx \infty$ （从取样点看进去）。





## 六、负反馈对输入电阻的影响



串联负反馈后的输入电阻是增大的， $R_{if} = (1 + AF)R_i$ 。

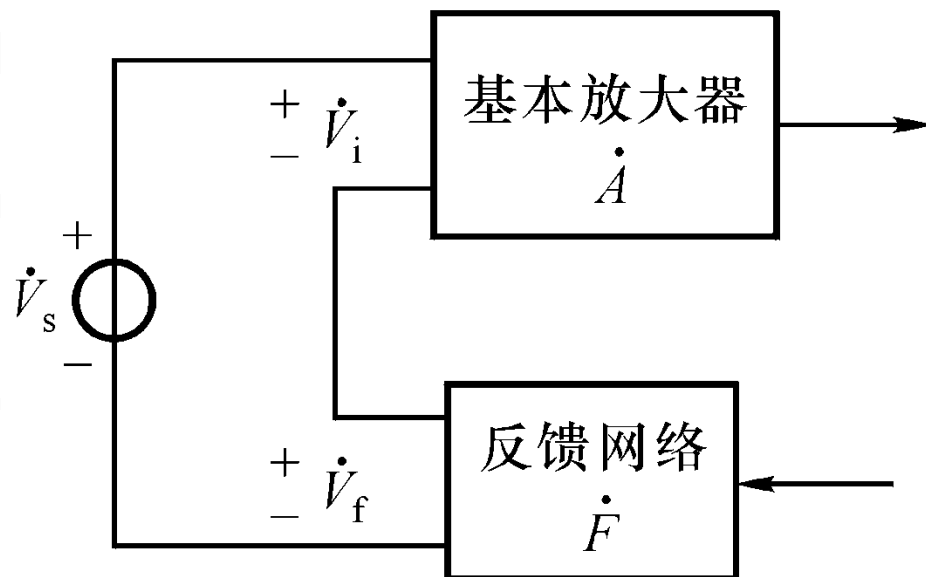
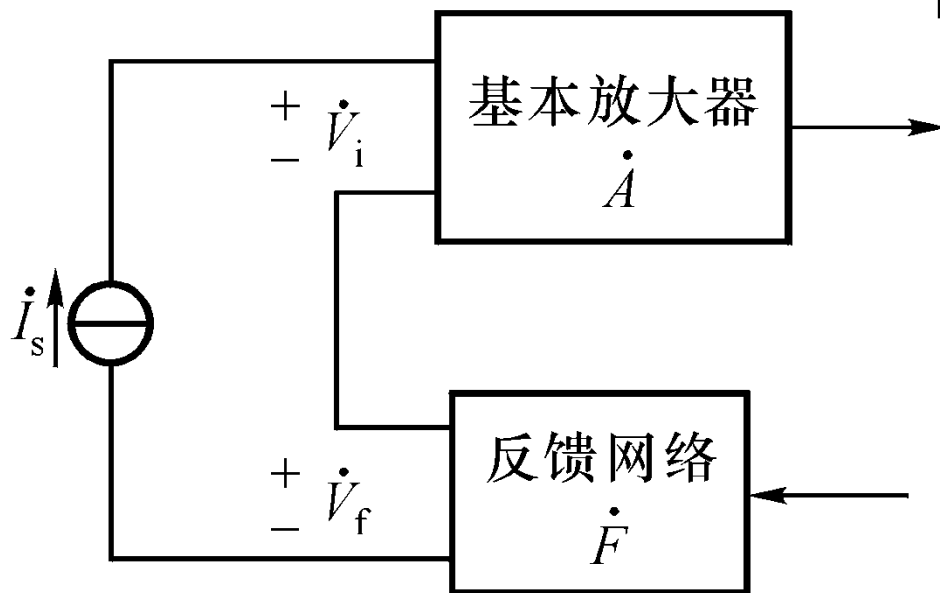
在深度负反馈条件下， $R_{if} \approx \infty$  (从求和点看进去)。

并联负反馈后的输入电阻是减小的， $R_{if} = R_i / (1 + AF)$ 。

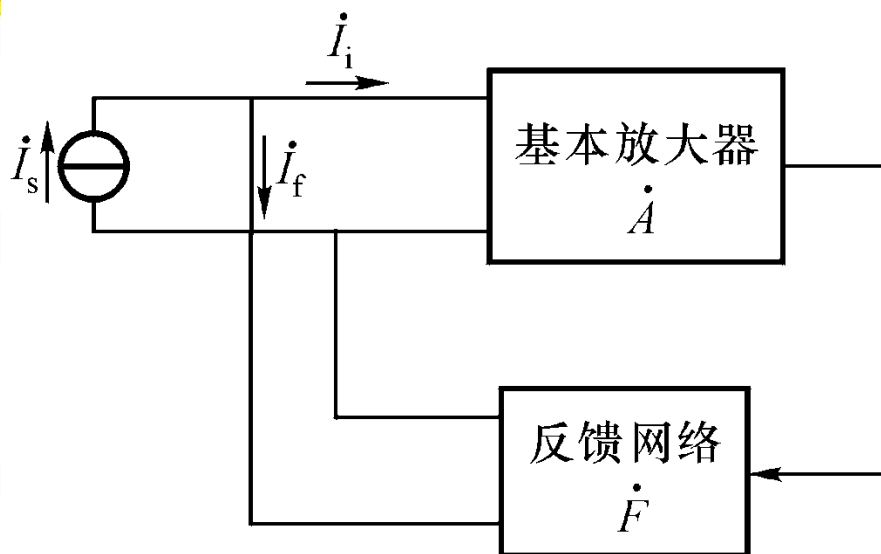
在深度负反馈条件下， $R_{if} \approx 0$  (从求和点看进去)。

## ➤ 串联/并联负反馈对信号源的要求

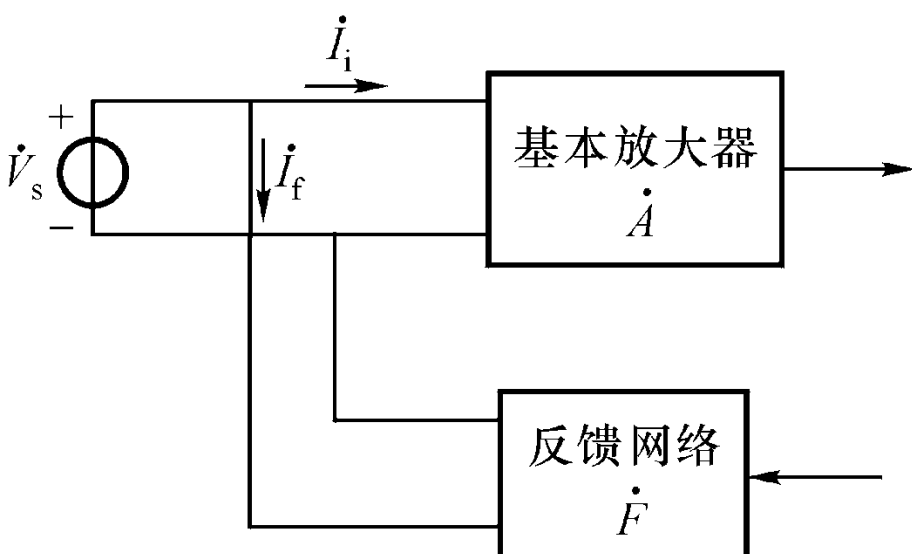
✧ 串联负反馈应采用电压源( $R_s \rightarrow 0$ )来激励。



若采用电流源( $R_s \rightarrow \infty$ )来激励, 则  $\dot{V}_i = \dot{I}_s R_i$  几乎为一常数, 没有负反馈调节作用。



✧ 并联负反馈应采用电流源( $R_s \rightarrow \infty$ )来激励。



若采用电压源( $R_s \rightarrow 0$ )来激励, 则  $\dot{I}_i = \dot{V}_s / R_i$  几乎为一常数, 没有负反馈调节作用。

对于**串联负反馈**放大电路, 为使反馈作用强, 应使信号源内阻**尽可能小**; 对于**并联负反馈**放大电路, 为使反馈作用强, 应使信号源内阻**尽可能大**。

## ➤ 电压/电流负反馈对负载的要求：

在引入电压负反馈时，为了提高反馈效果，要求负载 $R_L$ 尽可能大。

若 $R_L$ 大，则输出电压就大，反馈信号也大，反馈效果好。若 $R_L \rightarrow 0$ ,  $\dot{V}_o \rightarrow 0$ ，就没有反馈效果了。

同理，在引入电流负反馈时，为了提高反馈效果，要求负载 $R_L$ 尽可能小。

在音响放大电路中，负载为喇叭（设 $R_L=8\Omega$ ），那么应采用电压负反馈还是电流负反馈？



## 【例1】

1. 某传感器产生的是电压信号（几乎不提供电流），经过放大后希望输出电压与信号成正比，这时放大电路应选

【 A 】

A. 电压串联负反馈

B. 电压并联负反馈

C. 电流串联负反馈

D. 电流并联负反馈

2. 欲从信号源获得更大的电流，并稳定输出电流，应在放大电路中引入

【 D 】

A. 电压串联负反馈

B. 电压并联负反馈

C. 电流串联负反馈

D. 电流并联负反馈

## 2.3 集成运放构成的负反馈电路分析

➤ 深度负反馈 ( $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ )

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \approx \frac{1}{\dot{F}} \quad \dot{X}_f = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_i \approx (1 + \dot{A}\dot{F})\dot{X}_i = \dot{X}_s$$

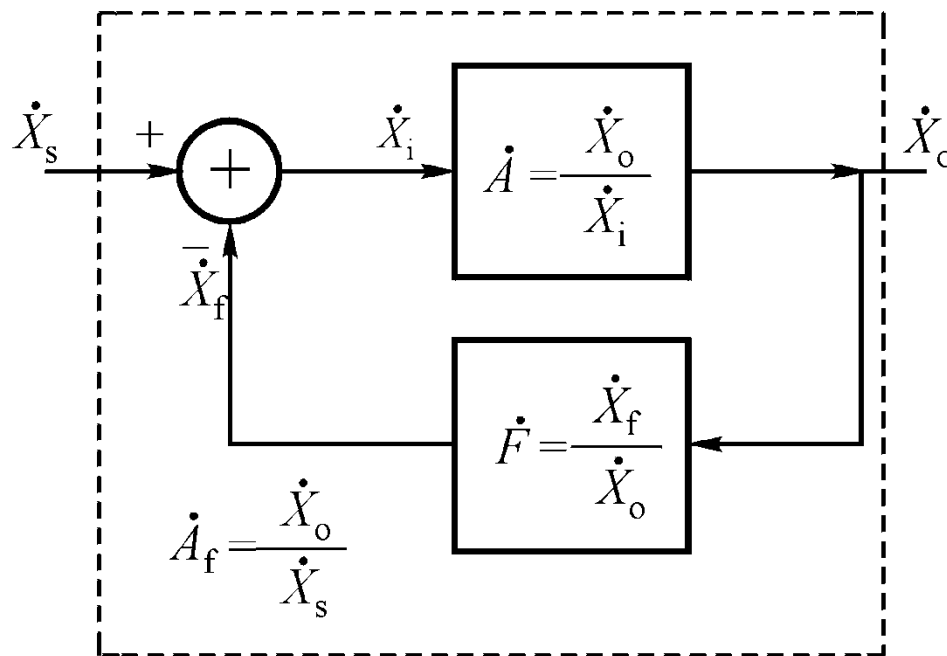
净输入:  $\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{X}_f \rightarrow 0$

✧ “虚短”

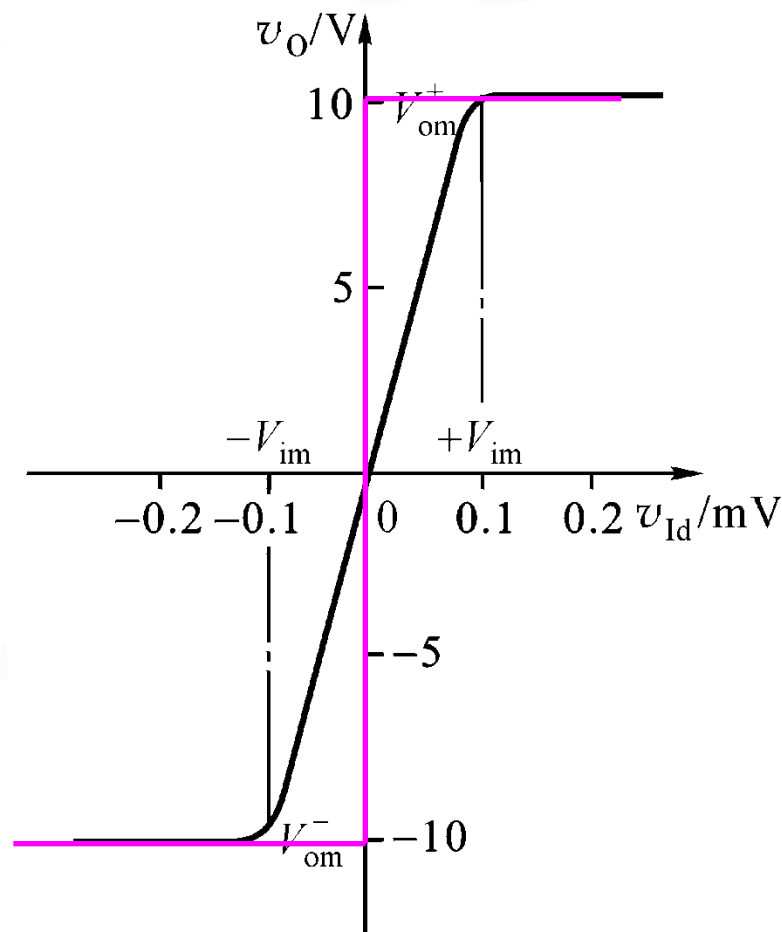
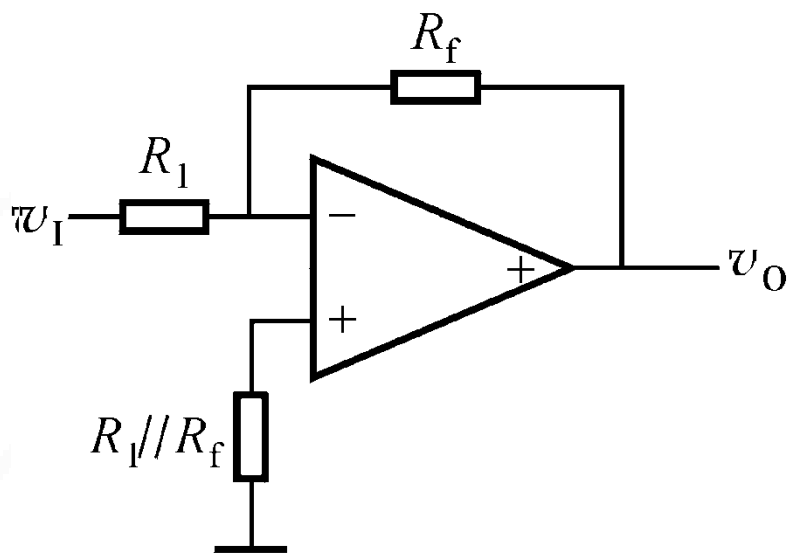
$$\dot{X}_i = \dot{V}_i \rightarrow 0$$

✧ “虚断”

$$\dot{X}_i = \dot{I}_i \rightarrow 0$$



## 集成运放构成的负反馈电路



✧ 通常为**深度**负反馈

✧ 运放工作在**线性**放大区

✧ “**虚短**”  $v_{Id} = v_{(+)} - v_{(-)} = \frac{v_o}{A_{od}} \approx 0$

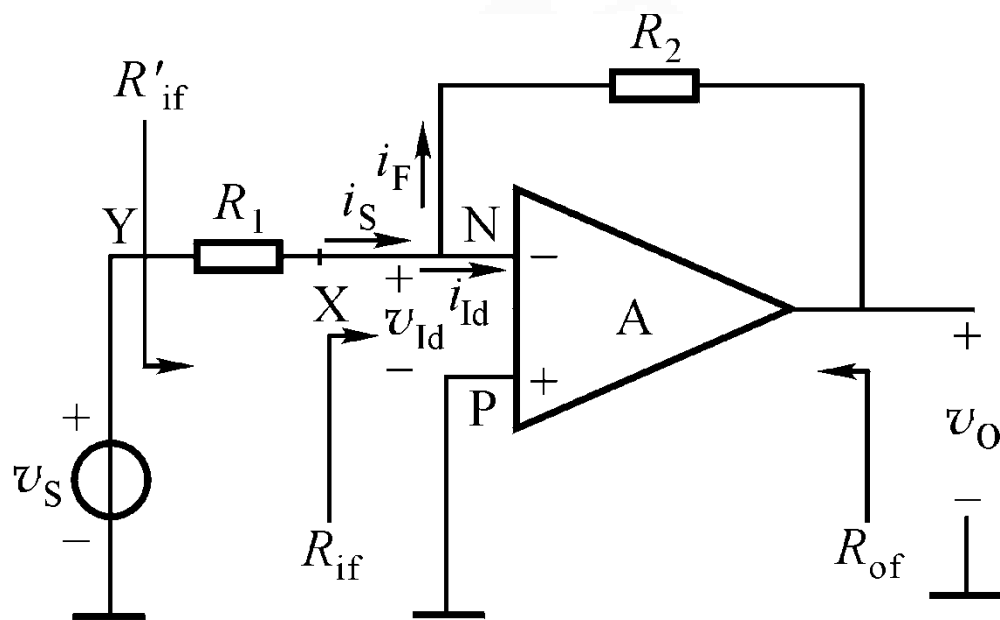
✧ “**虚断**”  $|i_{(+)}| = |i_{(-)}| = \frac{v_{Id}}{R_{id}} \approx 0$

✧ “**虚地**”

# 一、比例运算电路

有反相输入、同相输入和差分输入三种形式。

## ➤ 反相输入方式



电压并联负反馈

$$v_O = -i_F R_2$$

$$i_F = i_S = v_S / R_1$$

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_S$$

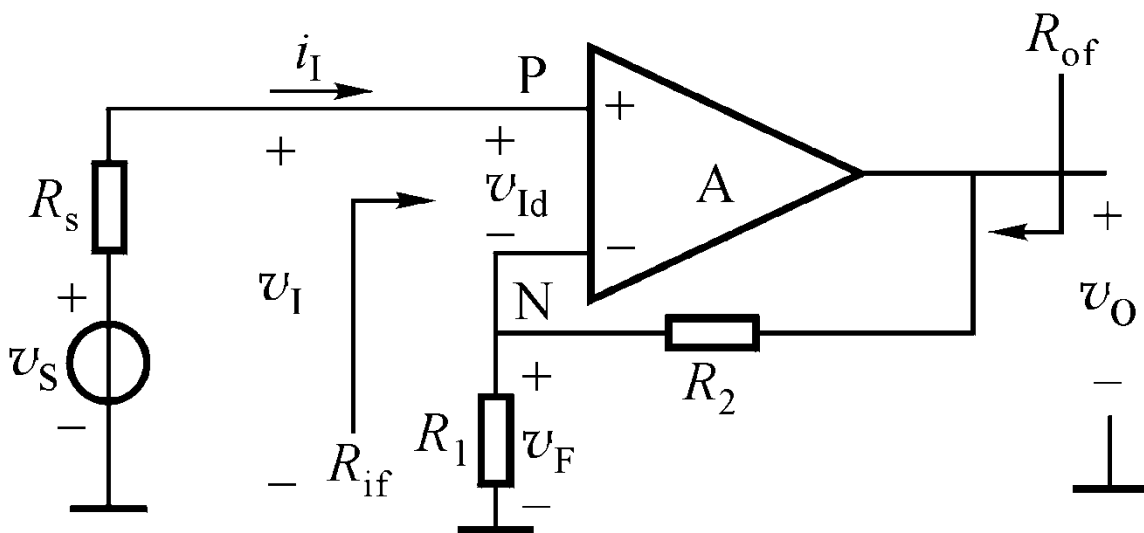
$$R_{if} = v_{Id} / i_S \rightarrow 0$$

$$R'_{if} = v_S / i_S = R_1$$

$$R_{of} \rightarrow 0$$



## 同相输入方式



电压串联  
负反馈

$$v_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_O = v_S$$

$$v_O = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_S$$

$$A_f = \frac{v_O}{v_S} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_{if} \rightarrow \infty$$

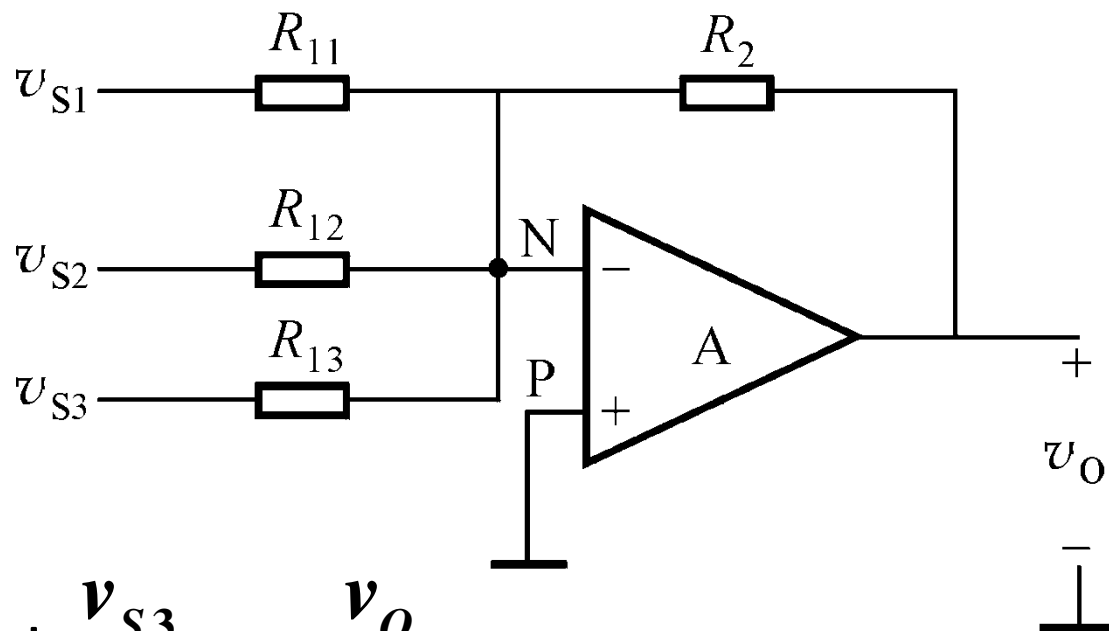
$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF} \rightarrow 0$$

当  $R_1$  开路时,  $v_O = v_S$ ,  
又称**电压跟随器**。

## 二、求和运算电路

分为反相输入、同相输入和双端输入三种形式。

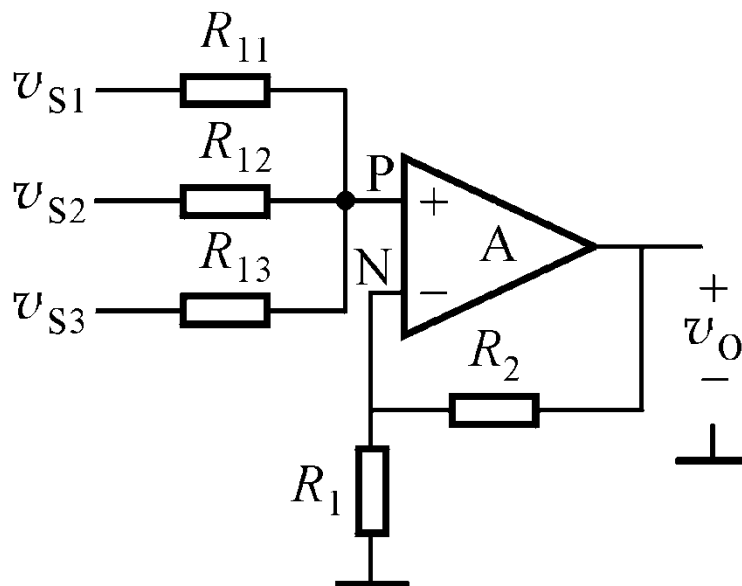
### ➤ 反相输入



$$\frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} = -\frac{v_O}{R_2}$$

$$v_O = -\left( \frac{R_2}{R_{11}} v_{S1} + \frac{R_2}{R_{12}} v_{S2} + \frac{R_2}{R_{13}} v_{S3} \right)$$

## 同相输入



$$\begin{aligned}
 v_P &= \frac{R_{12} // R_{13}}{R_{11} + R_{12} // R_{13}} v_{S1} + \frac{R_{11} // R_{13}}{R_{12} + R_{11} // R_{13}} v_{S2} + \frac{R_{11} // R_{12}}{R_{13} + R_{11} // R_{12}} v_{S3} \\
 &= (R_{11} // R_{12} // R_{13}) \left( \frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} \right) \\
 v_O &= \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_N = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (R_{11} // R_{12} // R_{13}) \left( \frac{v_{S1}}{R_{11}} + \frac{v_{S2}}{R_{12}} + \frac{v_{S3}}{R_{13}} \right)
 \end{aligned}$$

## 双端输入

$$v_P = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4}$$

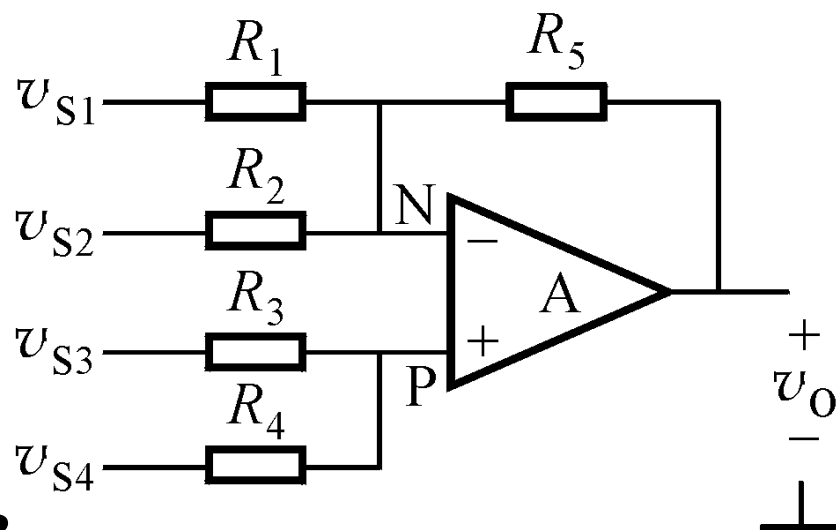
$$v_N = \frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1}$$

$$+ \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} + \frac{R_1 // R_2}{R_5 + R_1 // R_2} v_O$$

$$v_O = - \frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left( \frac{R_2 // R_5}{R_1 + R_2 // R_5} v_{S1} + \frac{R_1 // R_5}{R_2 + R_1 // R_5} v_{S2} \right)$$

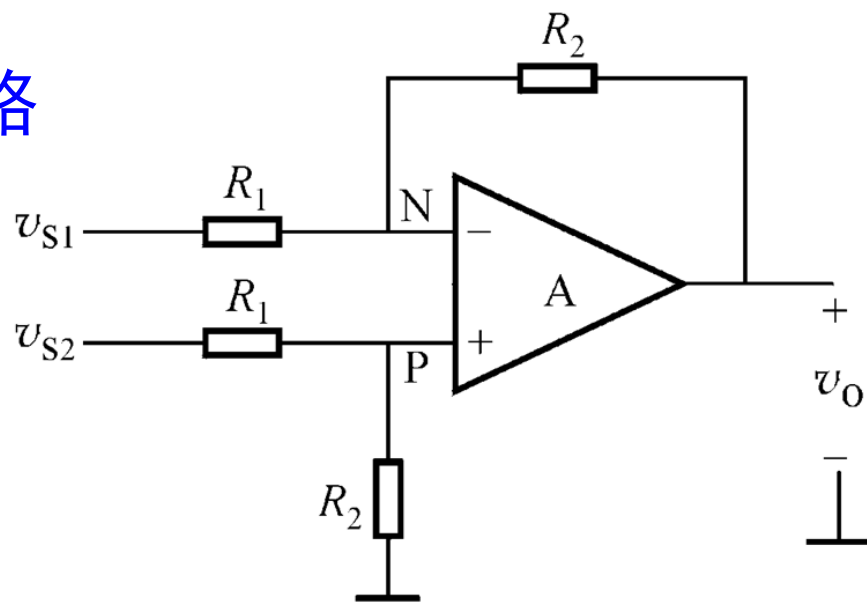
$$+ \frac{R_5 + R_1 // R_2}{R_1 // R_2} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right)$$

$$= - \frac{R_5}{R_1} v_{S1} - \frac{R_5}{R_2} v_{S2} + \left( 1 + \frac{R_5}{R_1 // R_2} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{S3} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} v_{S4} \right)$$



### 三、差分放大电路

#### ➤ 单运放差分放大电路



$$v'_O = -\frac{R_2}{R_1} v_{S1}$$

$$v''_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{S2} = \frac{R_2}{R_1} v_{S2}$$

$$v_O = v'_O + v''_O = \frac{R_2}{R_1} (v_{S2} - v_{S1})$$

## ➤ 三运放测量放大电路

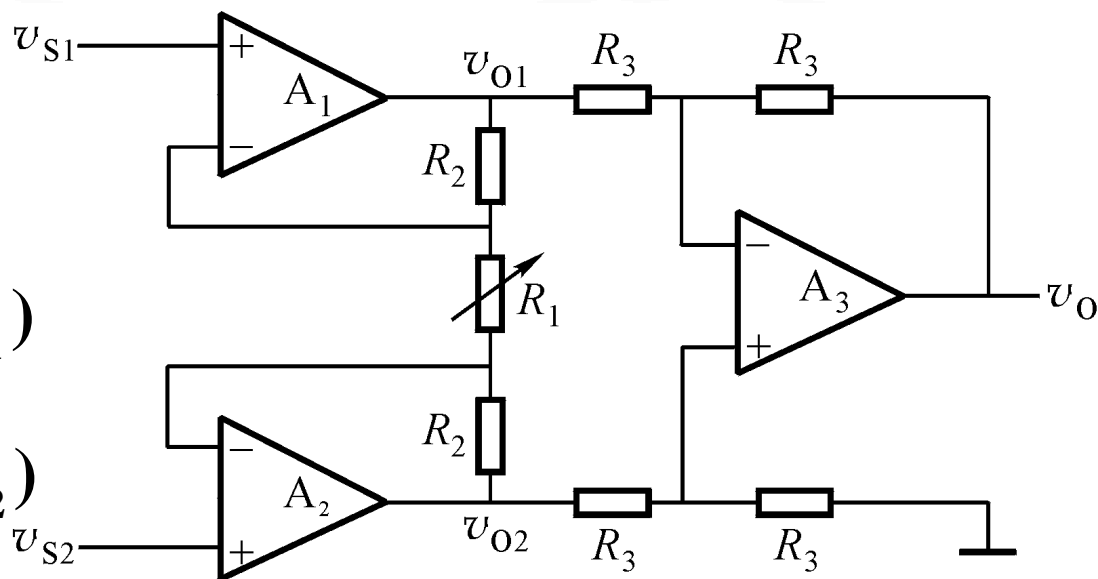
✧ 对于获取信号的仪用测量放大器，要求：高输入阻抗、高共模抑制比、低漂移、低噪声、低输出电阻，通常采用三运放的差分放大电路。

$$i_{R1} = \frac{v_{S1} - v_{S2}}{R_1}$$

$$v_{O1} - v_{O2} = i_{R1}(2R_2 + R_1)$$

$$= \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_{S1} - v_{S2})$$

$$v_O = v_{O2} - v_{O1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_{S2} - v_{S1})$$

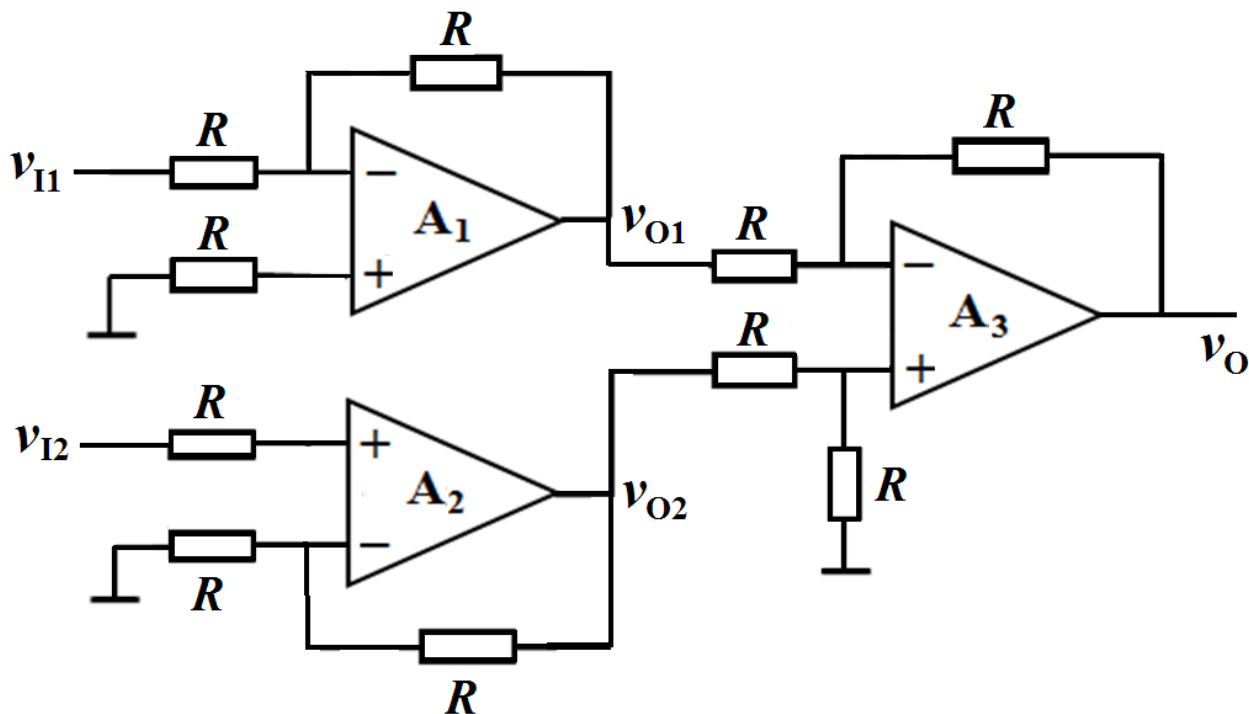




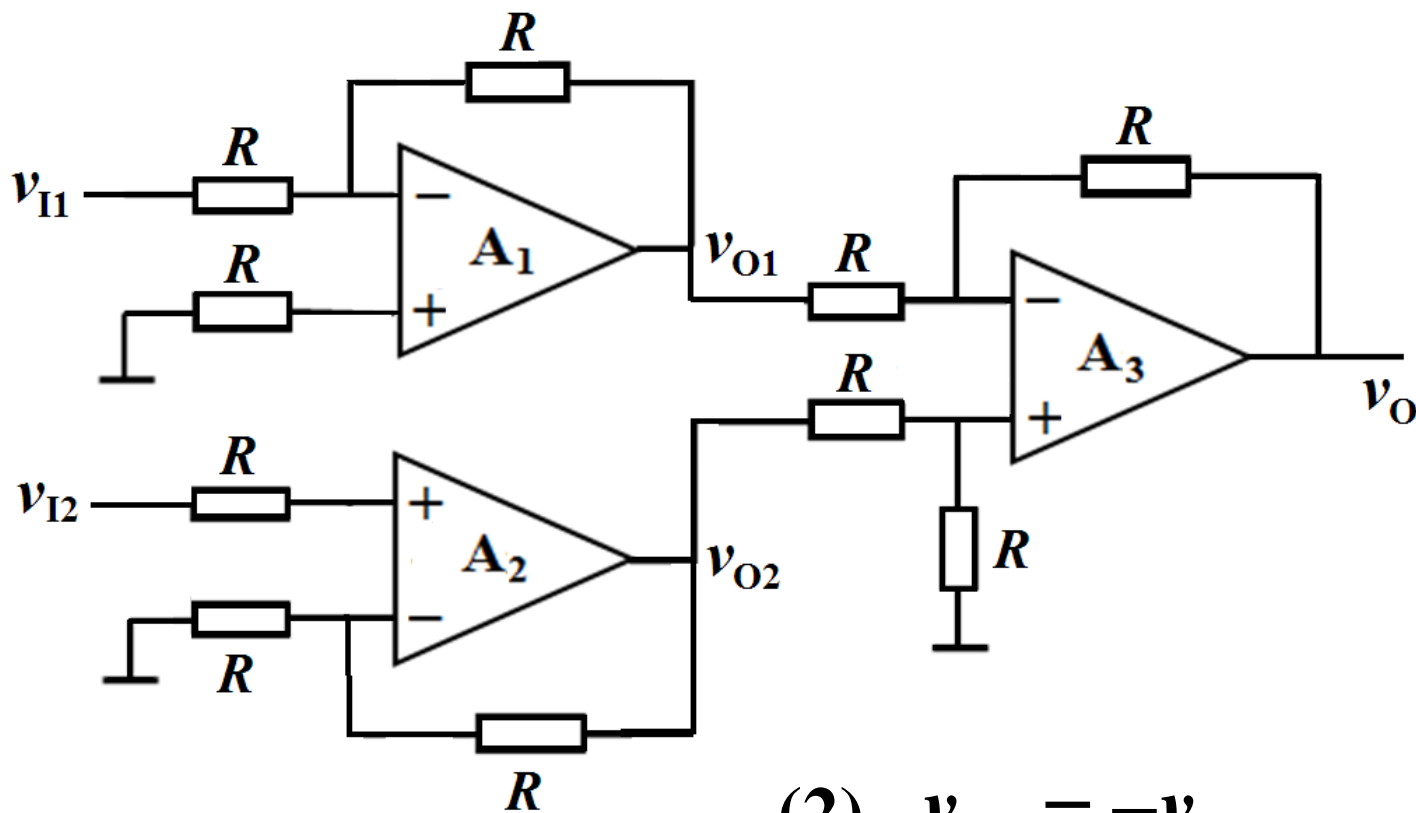
## 【例1】 练习

在图示电路中，设运放均为理想运放。

- (1) 分析 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 运放分别组成什么电路？
- (2) 分别写出 $v_{O1}$ 、 $v_{O2}$ 、 $v_O$ 的运算表达式。



【解】



(1)

$A_1$ : 反相比例运算电路

$A_2$ : 同相比例运算电路

$A_3$ : 差分放大电路

(2)  $v_{O1} = -v_{I1}$

$v_{O2} = 2v_{I2}$

$v_O = v_{O2} - v_{O1}$

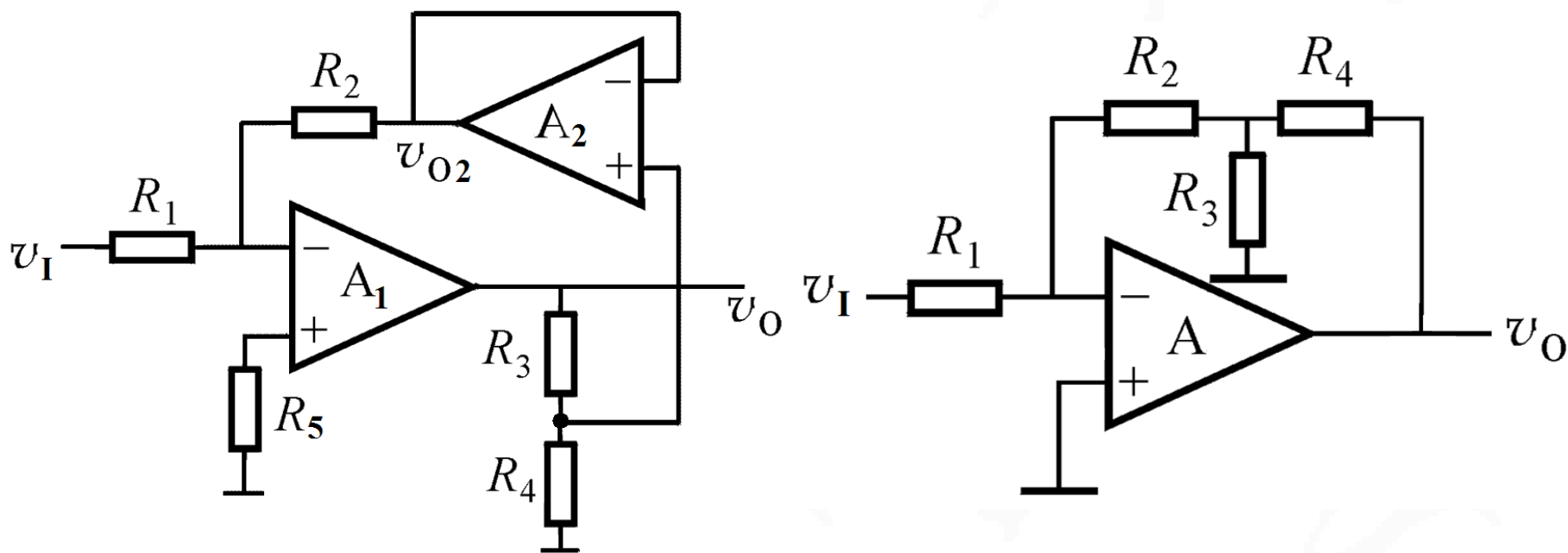
$= 2v_{I2} + v_{I1}$





## 【例2】 练习

设运算放大器为理想运放，写出输出电压 $v_O$ 与输入电压 $v_I$ 之间的关系式： $v_O = f(v_I)$ 。



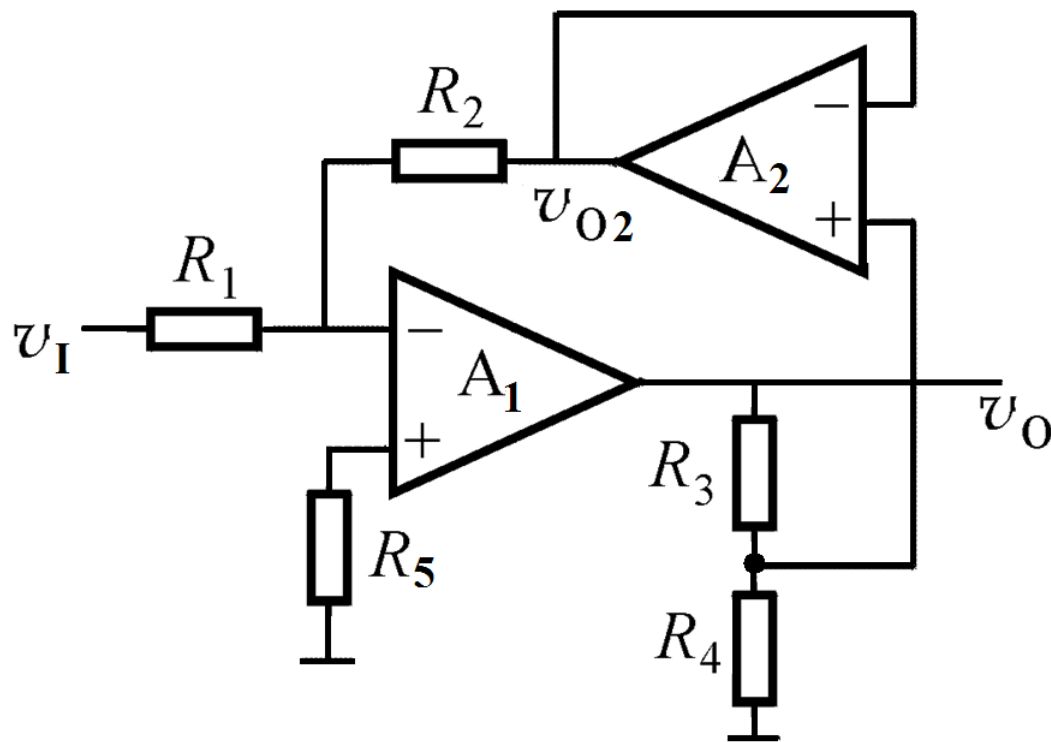
【解】

$$\frac{v_I}{R_1} = -\frac{v_{O2}}{R_2}$$

$$v_{O2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_O$$

$$v_O = \frac{R_3 + R_4}{R_4} v_{O2}$$

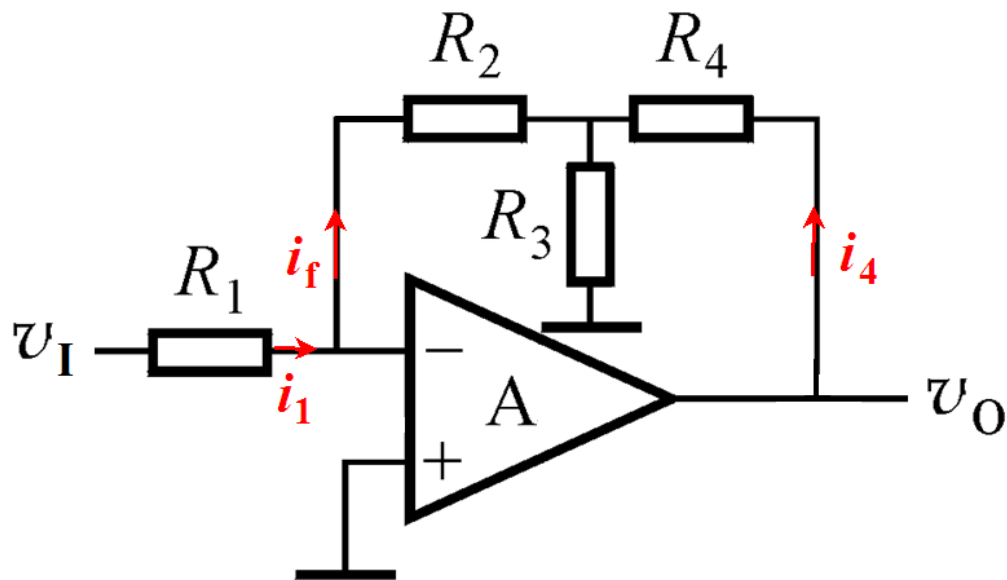
$$= -\frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot v_I$$





$$i_1 = \frac{v_I}{R_1} = i_f$$

$$i_f = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} i_4$$



$$v_O = i_4 \times (R_4 + R_2 // R_3) = (R_4 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}) \times i_4$$

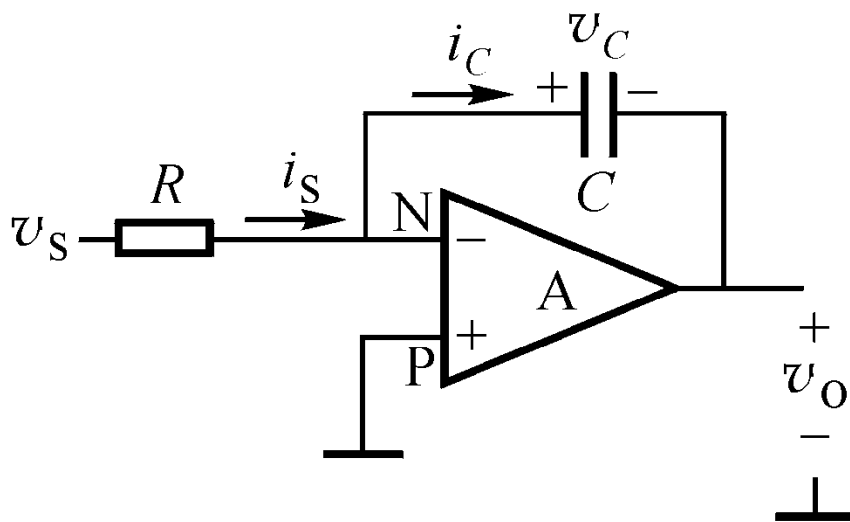
$$= \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4}{R_2 + R_3} \times (-\frac{R_2 + R_3}{R_3}) \times i_f$$

$$= -\frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_3 R_4}{R_1 R_3} v_I$$



## 四、积分和微分运算电路

### ➤ 积分运算



$$i_S = i_C$$

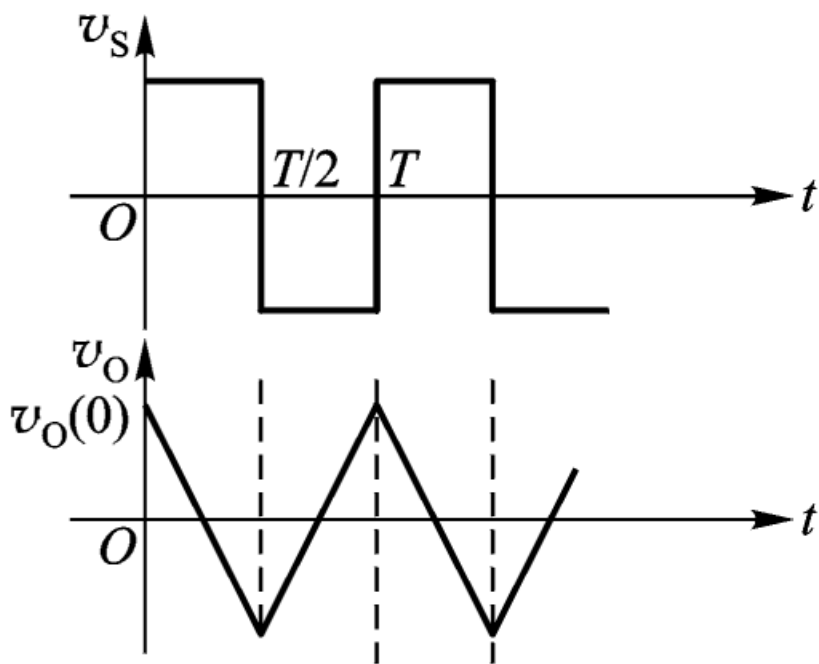
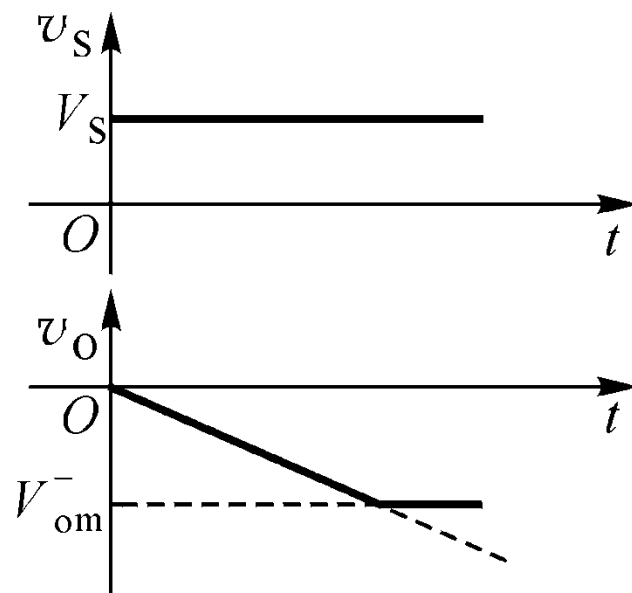
$$\frac{v_S}{R} = -C \cdot \frac{dv_O}{dt}$$

设  $v_C(0)=0$ , 则 
$$v_O = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_S dt$$



若输入阶跃信号，则

$$v_O = -\frac{V_S}{RC}t$$



若输入方波，则输出三角波。

$$v_O(t_2) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} v_S dt + v_O(t_1)$$

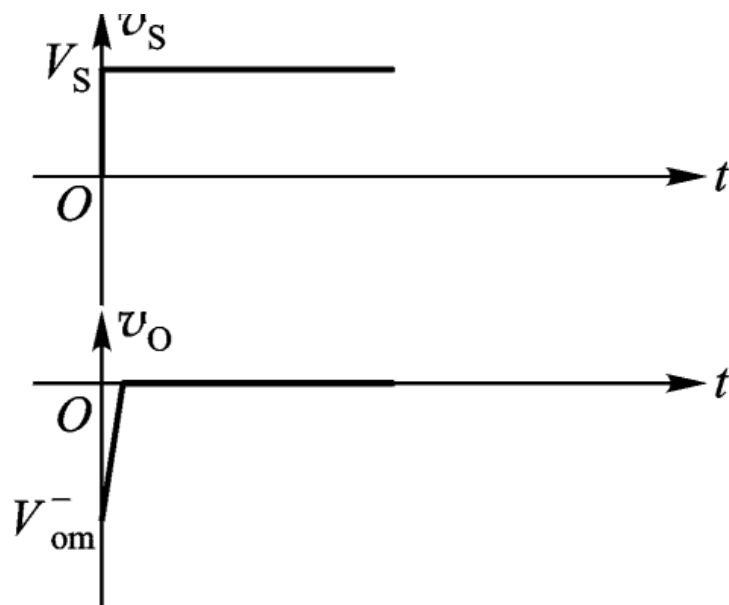
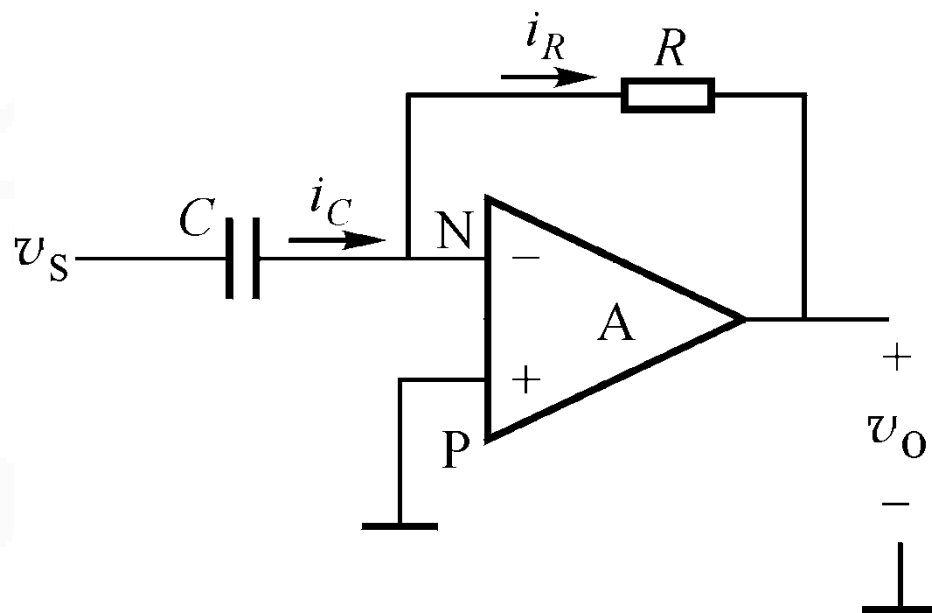
## ➤ 微分运算

$$i_R = i_C = C \frac{dv_S}{dt}$$

$$v_O = -i_R \cdot R$$

$$= -RC \frac{dv_S}{dt}$$

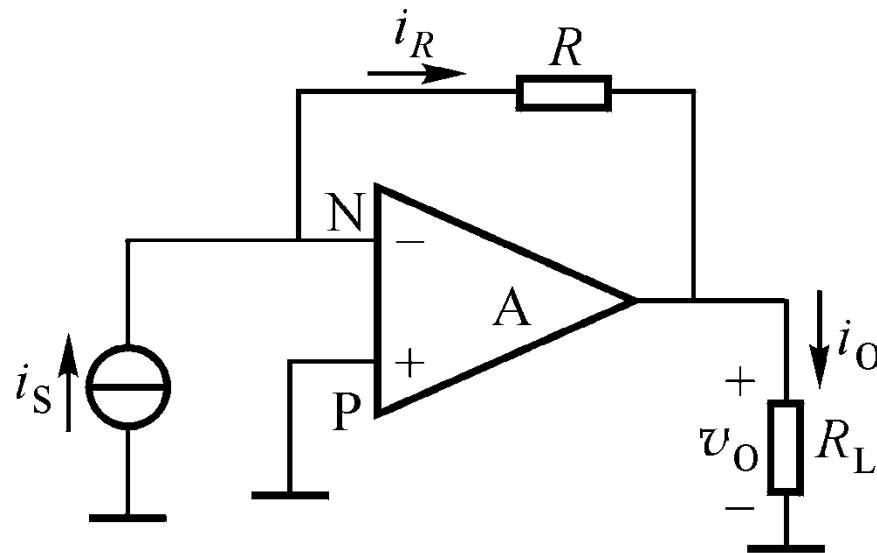
若输入为一个阶跃信号，输出理论上为冲击函数，而实际上只是一种尖顶波。



## 五、电流-电压和电压-电流变换电路

### ➤ 电流-电压变换电路

为什么要引入电压  
并联负反馈？



$$v_O = -i_S \cdot R \quad \text{与负载 } R_L \text{ 无关。}$$

✧ 该电路还可以作为电流放大器使用。

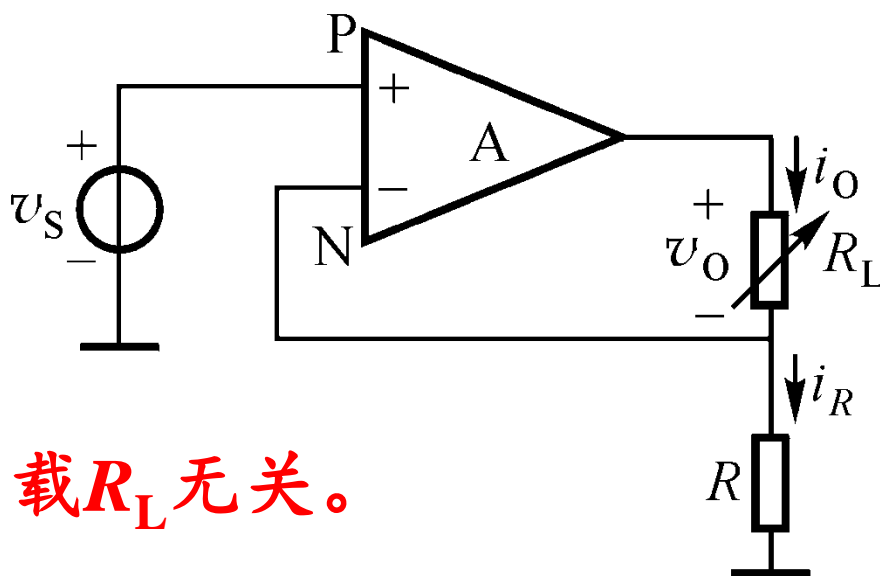
## ➤ 电压-电流变换电路

✧ 应该引入什么组态的负反馈？

✧ 负载不接地：

$$i_O = i_R = \frac{v_S}{R}$$

$$i_O = \frac{1}{R} v_S \quad \text{与负载 } R_L \text{ 无关。}$$



✧ 有些电路要求负载接地，这时应该如何引入反馈？





## ✧ 负载接地时:

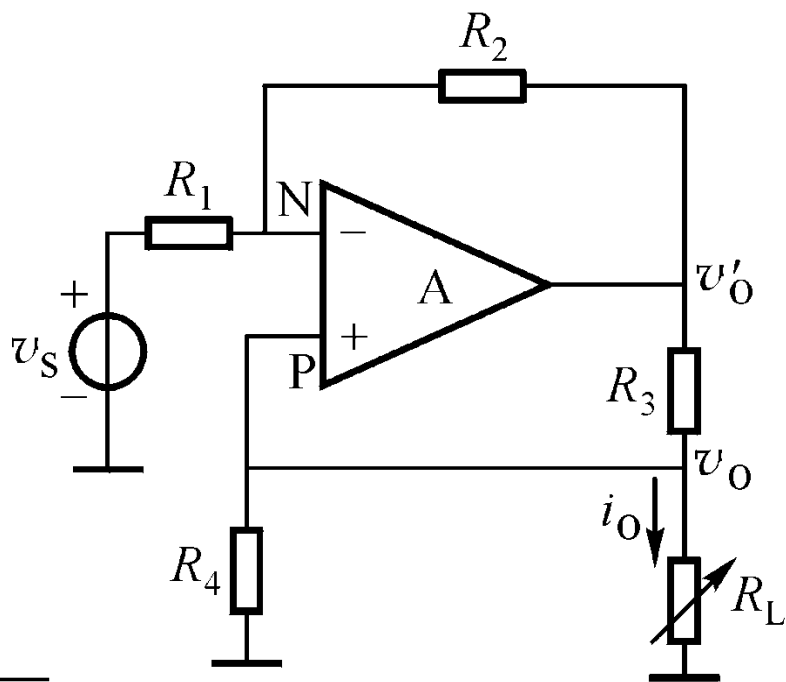
$$v_N = v_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_O' \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_P = v_O = v_O' \frac{R_4 // R_L}{R_3 + R_4 // R_L} = i_O R_L$$

$$i_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{v_S}{R_3 + \frac{R_3}{R_4} R_L - \frac{R_2}{R_1} R_L}$$

$$\text{当 } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \text{ 时, } i_O = -\frac{1}{R_4} v_S$$

与负载  $R_L$  无关。



## 六、运放在非线性电路中的应用

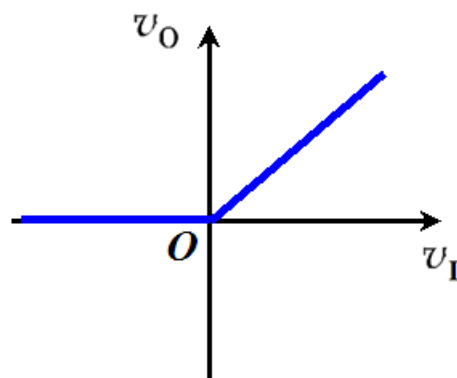
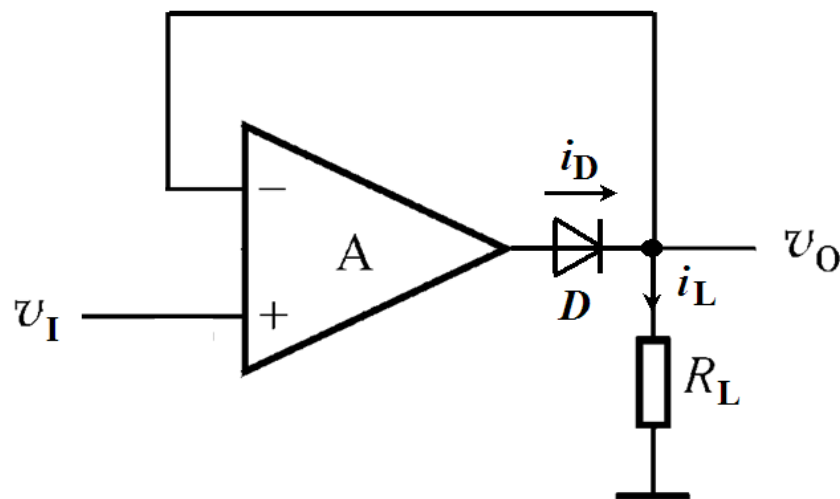
### ➤ 精密半波整流电路

✧ 当  $v_I > 0$  时， $D$  导通，运放为电压跟随器， $v_O = v_I$ 。

✧ 当  $v_I < 0$  时， $D$  截止，反馈回路断开， $v_O = 0$ 。

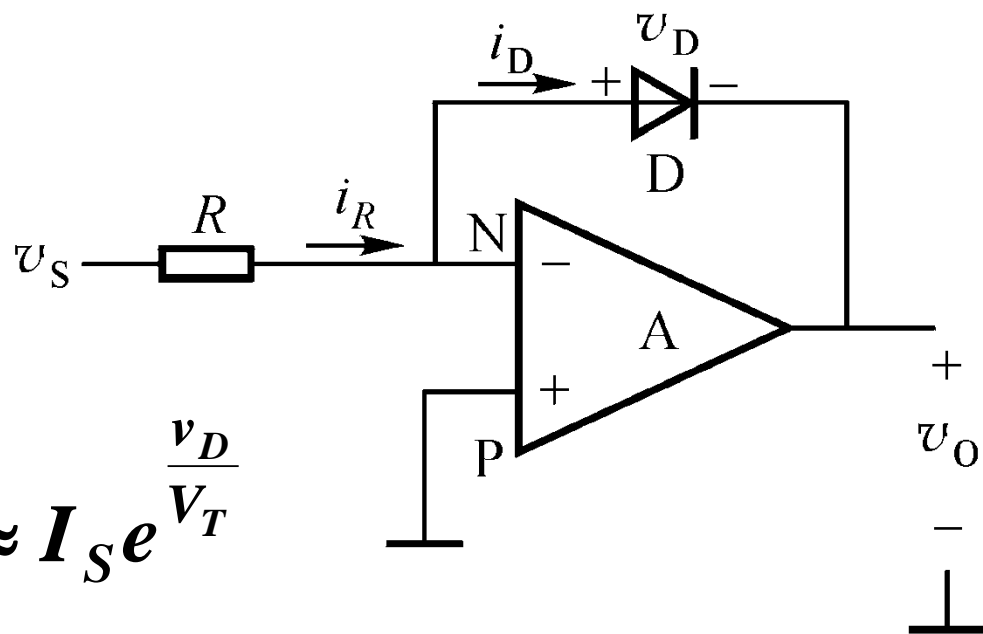
✧ 电压传输特性如图。

➤ 精密全波整流电路（略，自学）





## 对数运算电路



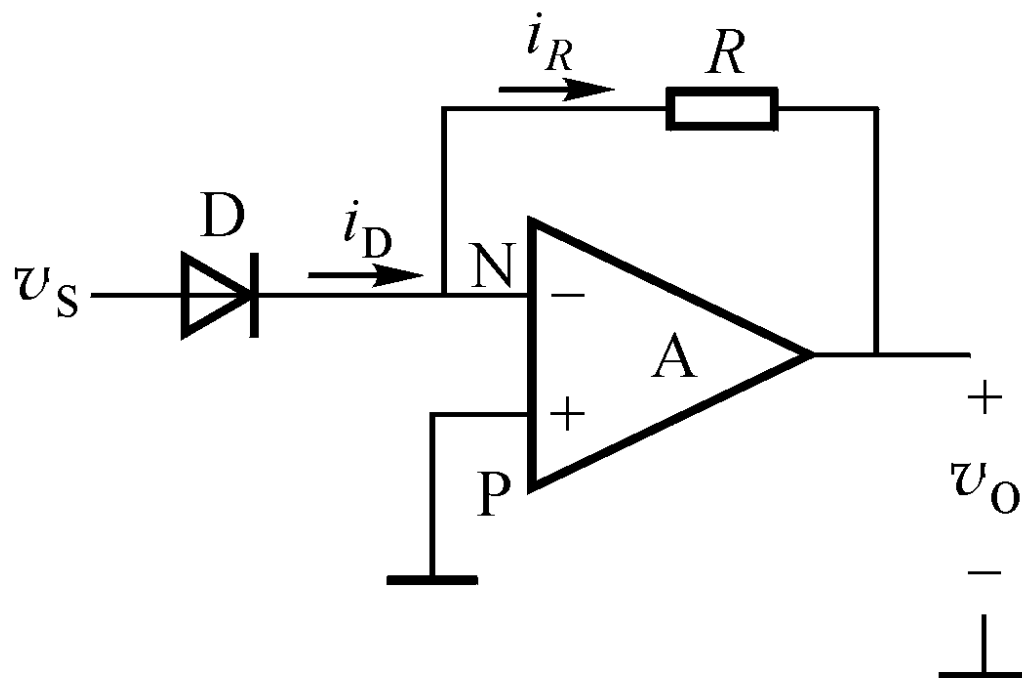
$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_R = \frac{v_S}{R} = i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$v_O = -v_D = -V_T \ln \frac{v_S}{R \cdot I_S}$$



## ➤ 指数运算电路



$$v_O = -i_R \cdot R = -i_D \cdot R = -I_S R \cdot e^{v_S / V_T}$$

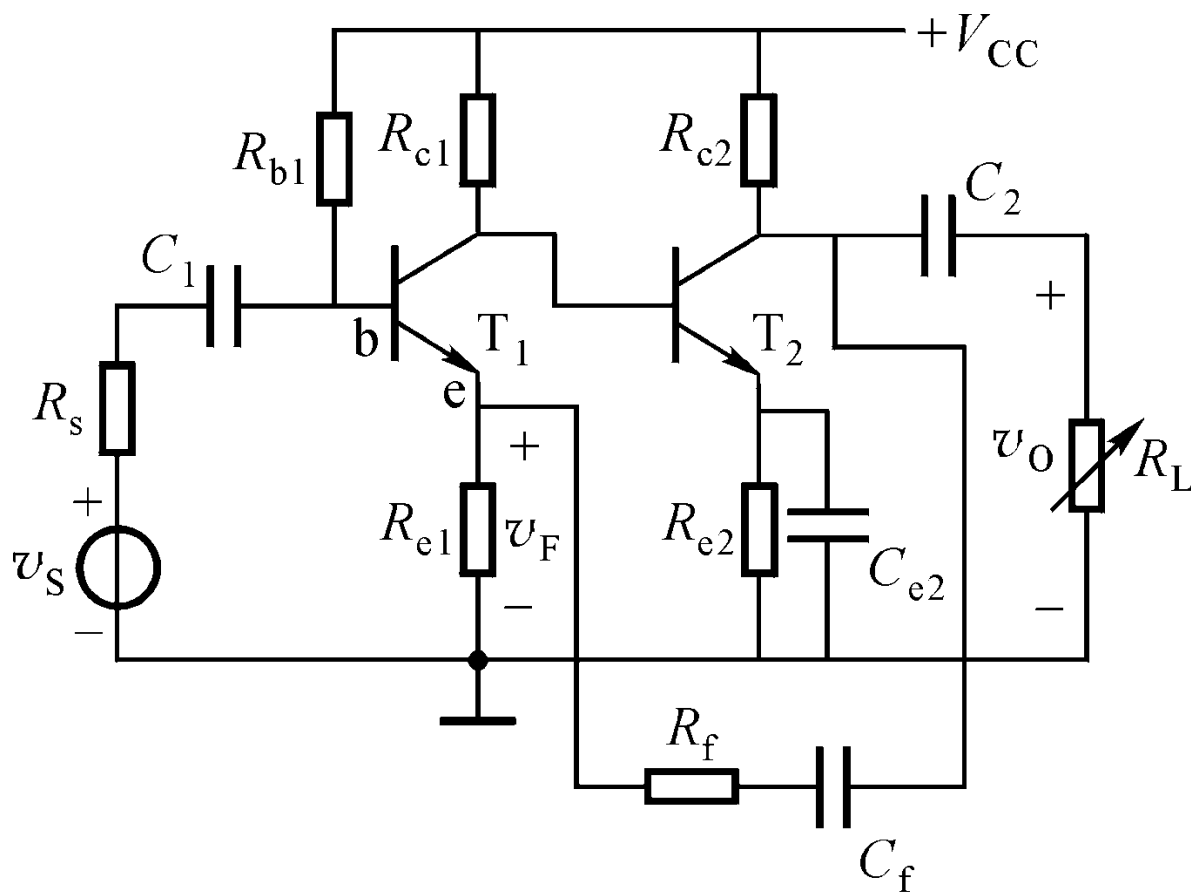


## 2.4 深度负反馈放大电路的分析

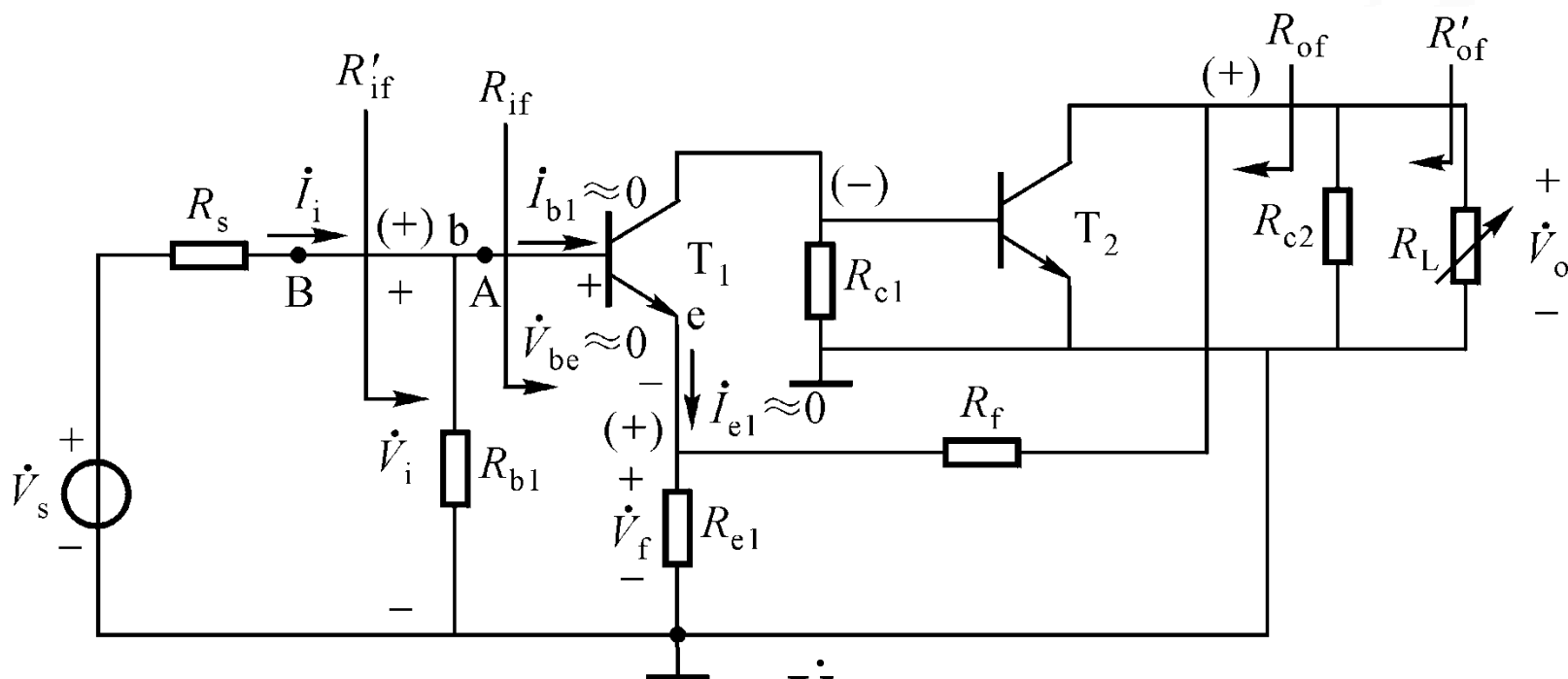
对于分立元件构成的多级负反馈放大电路，一般也可以作为深度负反馈来处理。

### 【例1】

假设电路满足深度反馈的条件，计算 $A_{vf}$ 、 $R_{if}$ 和 $R_{of}$ 。



【解】 分析分立元件构成的反馈放大电路，应考虑  
交流通路，并找出反馈信号和净输入信号。



$$\dot{V}_i = \dot{V}_f = \dot{V}_o \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f}$$

$$R_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_{b1}} \rightarrow \infty \quad R_{of} \rightarrow 0$$

$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$

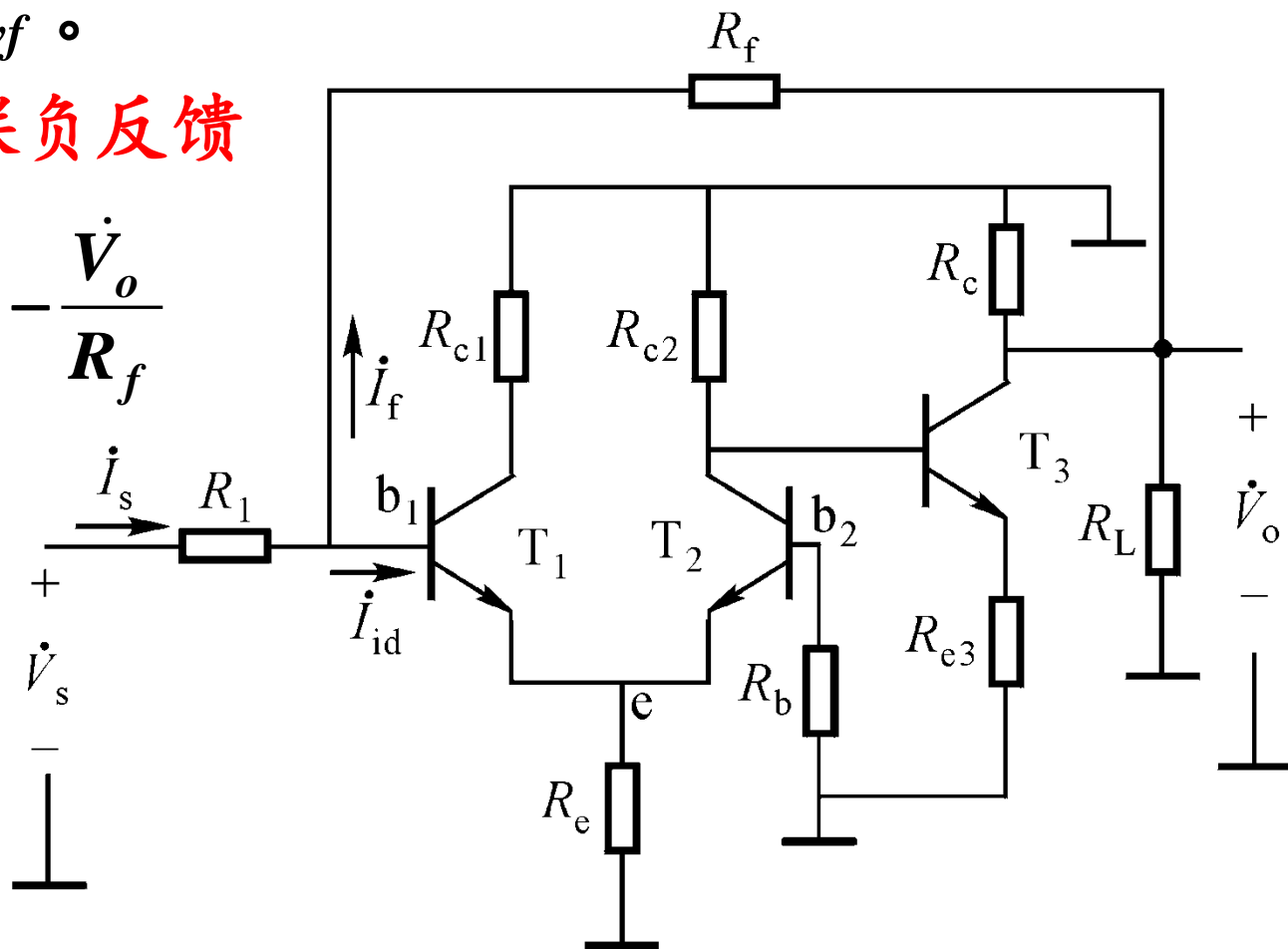
$$R'_{if} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i} = R_{b1} \quad R'_{of} = R_{c2} // R_{of} = 0$$

【例2】差放输入级构成的多级负反馈放大器如图所示(交流通路), 假设电路能满足深度负反馈的条件, 试分析计算  $\dot{A}_{vf}$ 。

【解】电压并联负反馈

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{V}_s}{R_1} = \dot{I}_f = -\frac{\dot{V}_o}{R_f}$$

$$\dot{A}_{vf} = -\frac{R_f}{R_1}$$





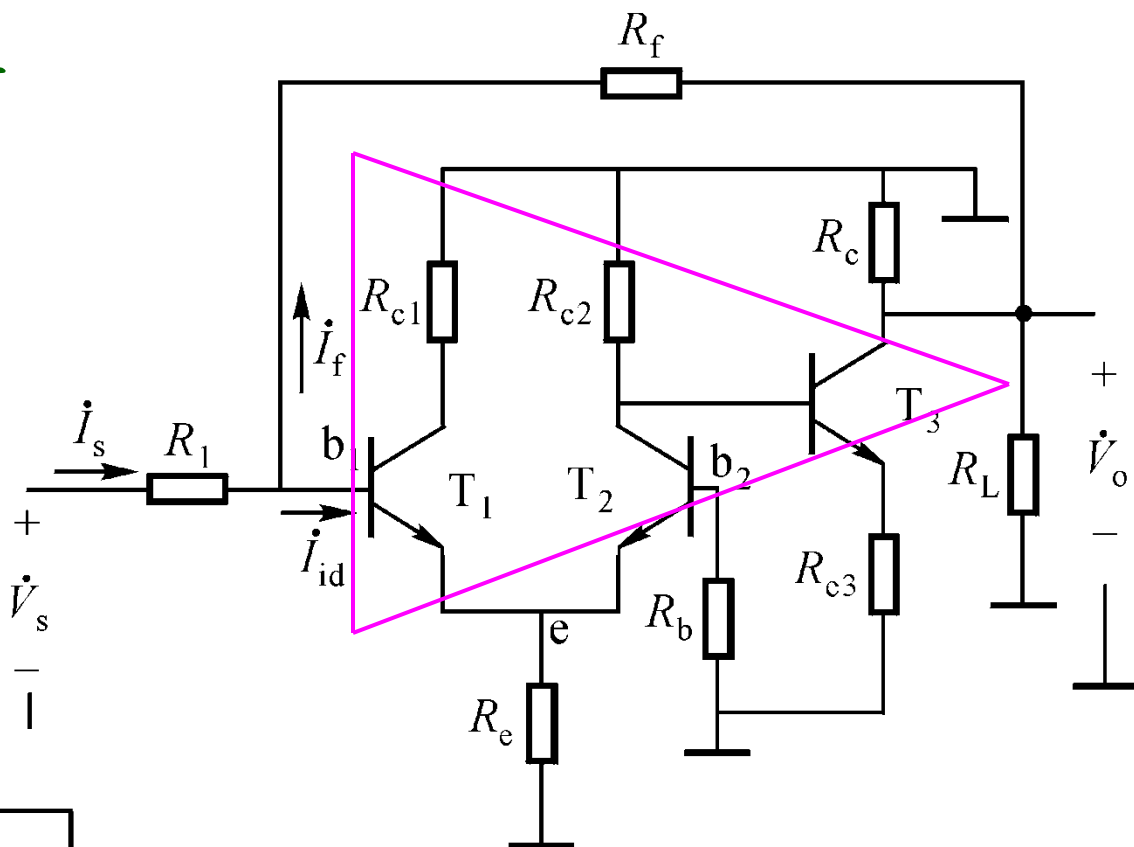
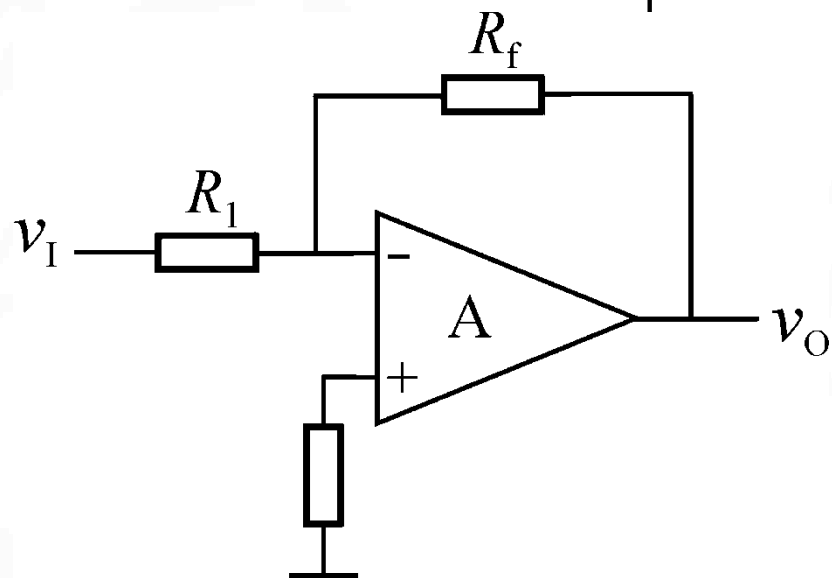
## ➤ 小结与讨论：负反馈放大电路的近似分析

- ✧ 当基本放大器由二级以上放大电路组成时，通常可认为满足深度负反馈的条件。
- ✧ 应考虑交流通路，区分  $\dot{V}_{be} \approx 0$  与  $v_{BE}=0.7V$  之间的关系。
- ✧ 找出净输入量，在负反馈时净输入量减小，当深度负反馈时净输入量大大减小，以至可以忽略。
- ✧ 注意反馈框图中的闭环输出电阻（从取样点看进去）与整个电路的输出电阻（从负载两端看进去）的差异。输入电阻亦是如此。
- ✧ 注意电压负反馈与比例运算电路的比较。



## 电压并联负反馈

$$\dot{A}_{vf} = -\frac{R_f}{R_1}$$

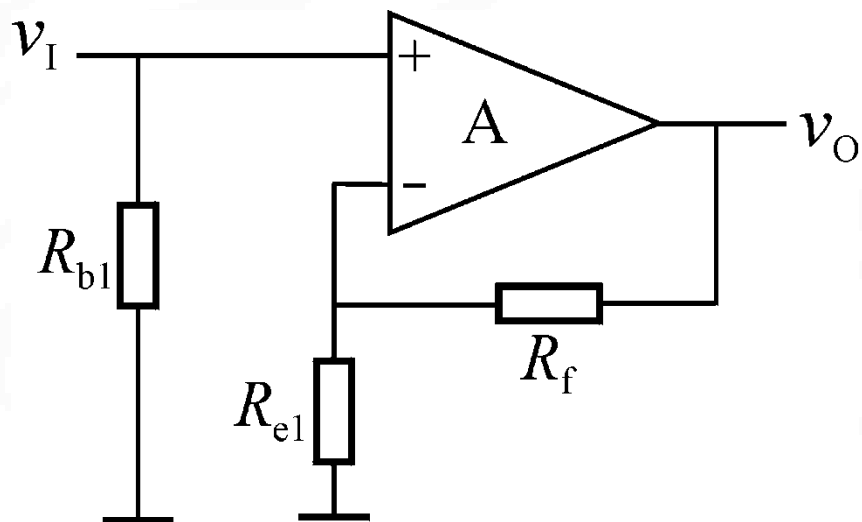
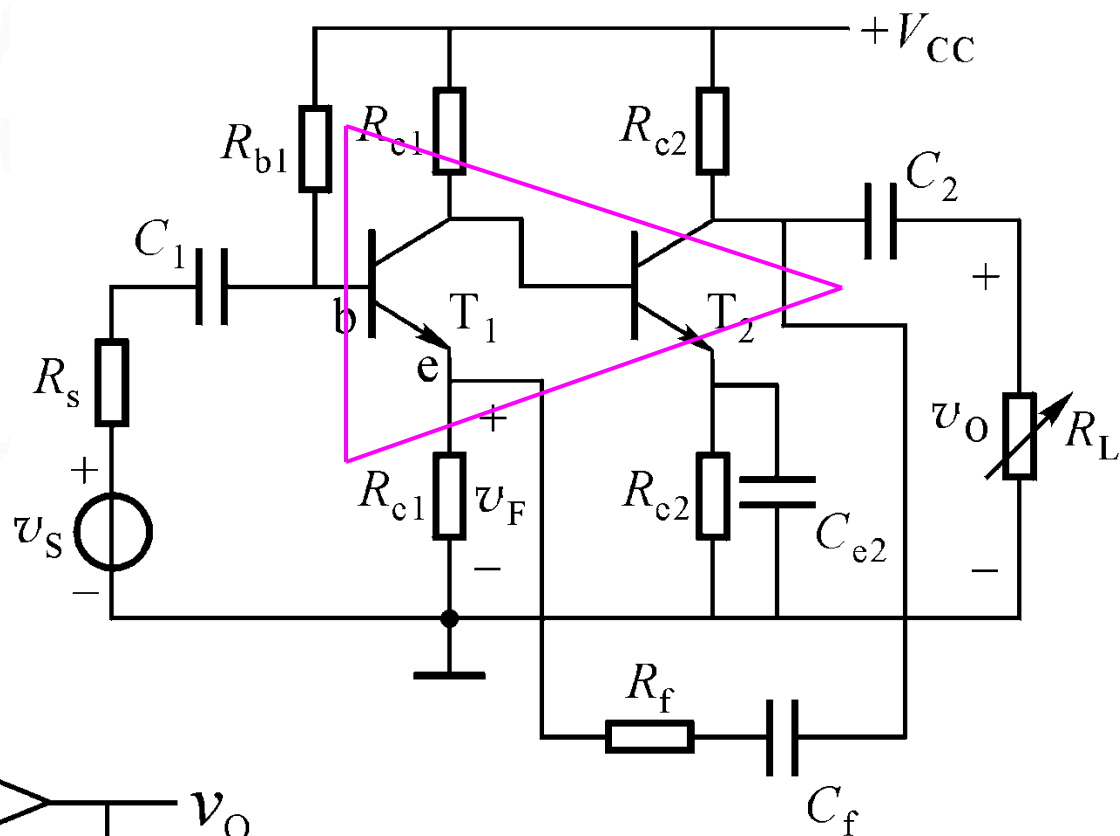


反相比例运算电路



## 电压串联负反馈

$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{e1}}$$



同相比例运算电路



## 【例3】练习

分析反馈组态，指出净输入量，计算闭环源电压增益 $A_{vsf}$ 、信号源侧看进去的输入电阻 $R_{if}$ 和负载侧看进去的 $R_{of}$ 。

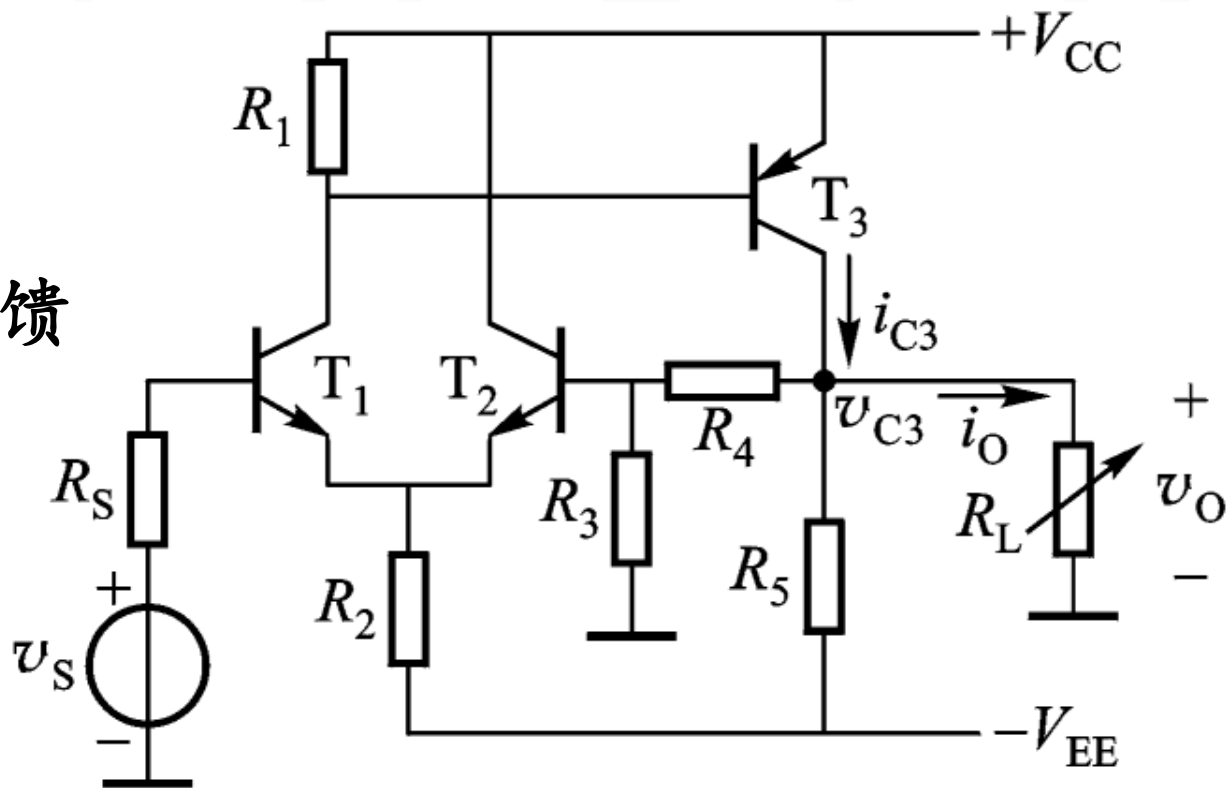
【解】

电压串联负反馈

$$A_{vsf} = \frac{v_o}{v_s}$$

$$= 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_{if} = \infty, R_{of} = 0$$



## 【例4】 练习

分析反馈组态，指出净输入量，计算闭环源电压增益 $A_{vsf}$ 、信号源侧看进去的输入电阻 $R_{if}$ 和负载侧看进去的 $R_{of}$ 。

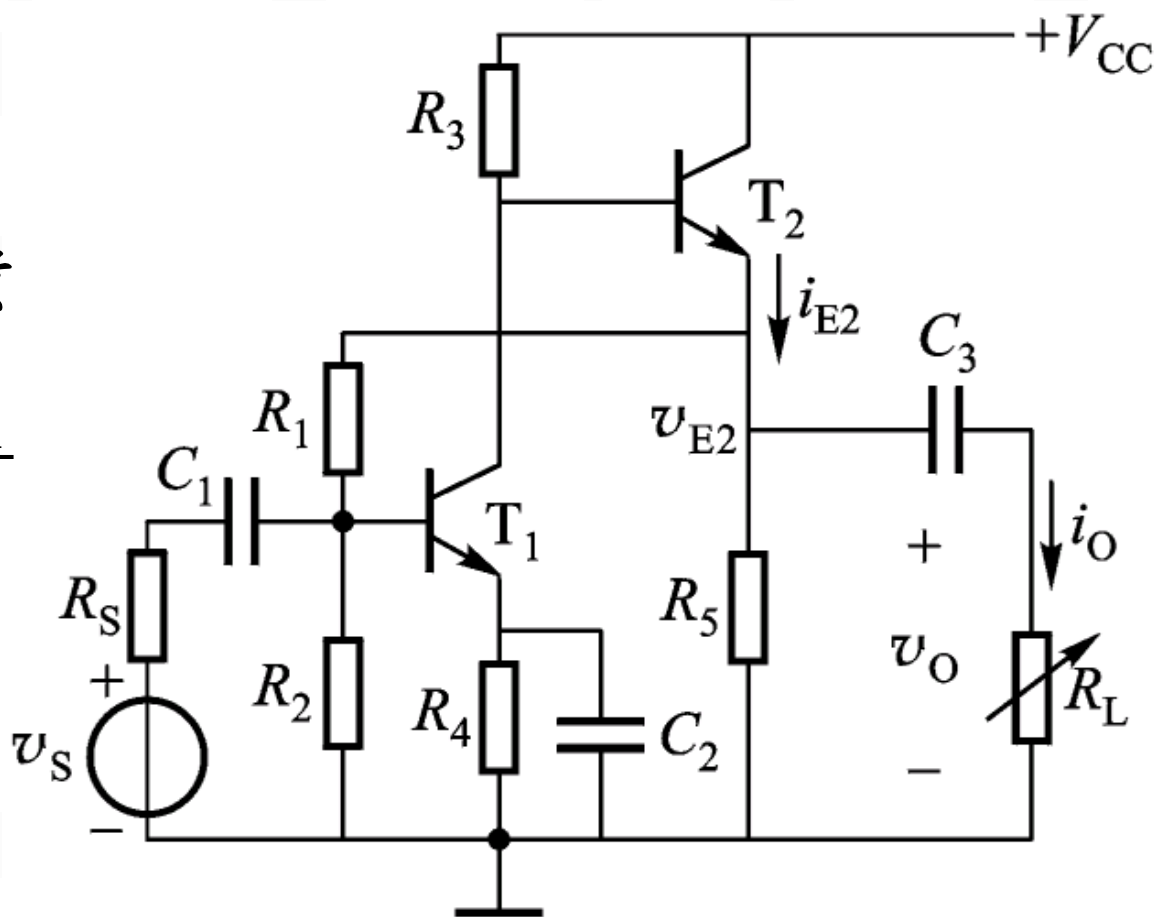
【解】

电压并联负反馈

$$A_{vsf} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_1}{R_s}$$

$$R_{if} = 0$$

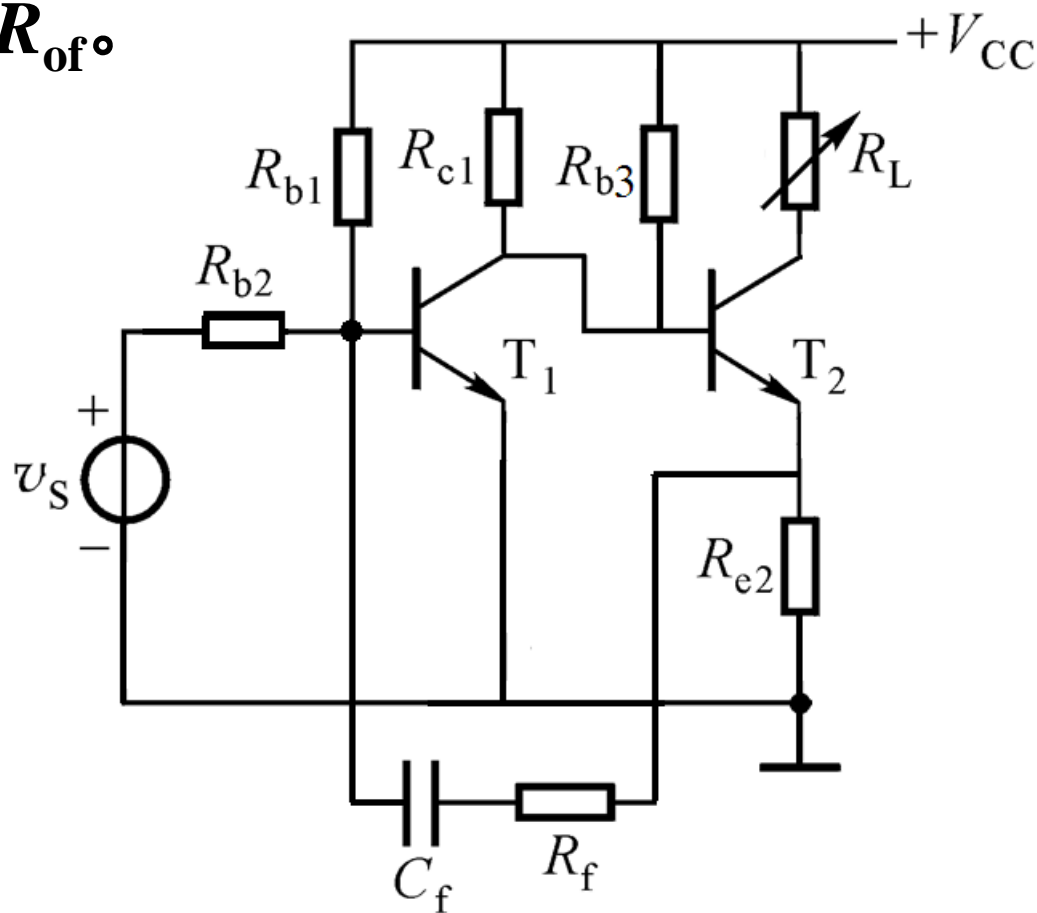
$$R_{of} = 0$$



## 【例5】 练习

图示为分立元件组成的多级负反馈放大电路，假设电路满足深度负反馈条件，试分析反馈组态，计算

$A_{vsf}$ 、 $R_{if}$ 和 $R_{of}$ 。



## 【解】 电流并联负反馈

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{V}_s}{R_{b2}} = \dot{I}_f = -\frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \dot{I}_{e2}$$

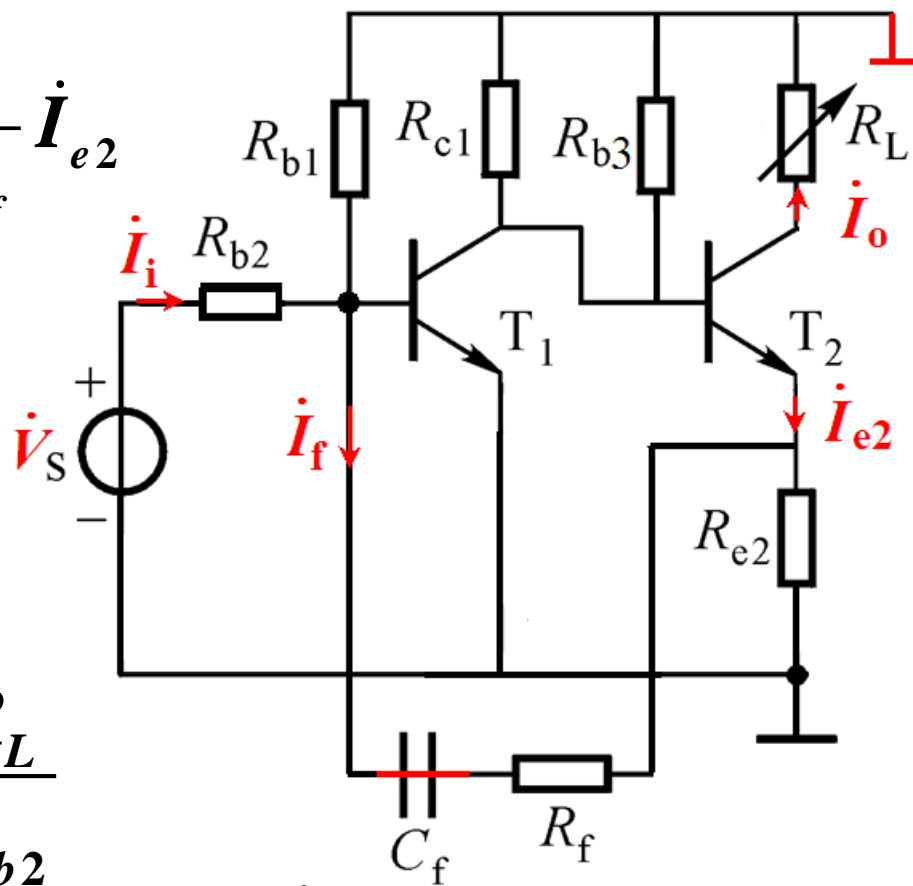
$$\dot{V}_o = \dot{I}_o \cdot R_L \approx -\dot{I}_{e2} \cdot R_L$$

$$\frac{\dot{V}_s}{R_{b2}} = \frac{R_{e2}}{R_{e2} + R_f} \cdot \frac{\dot{V}_o}{R_L}$$

$$\dot{A}_{vsf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \left(1 + \frac{R_f}{R_{e2}}\right) \cdot \frac{R_L}{R_{b2}}$$

$$R'_{if} = 0, R_{if} = R_{b2} \quad \text{或} \quad R_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_i} = R_{b2}$$

$$R_{of} = \infty$$



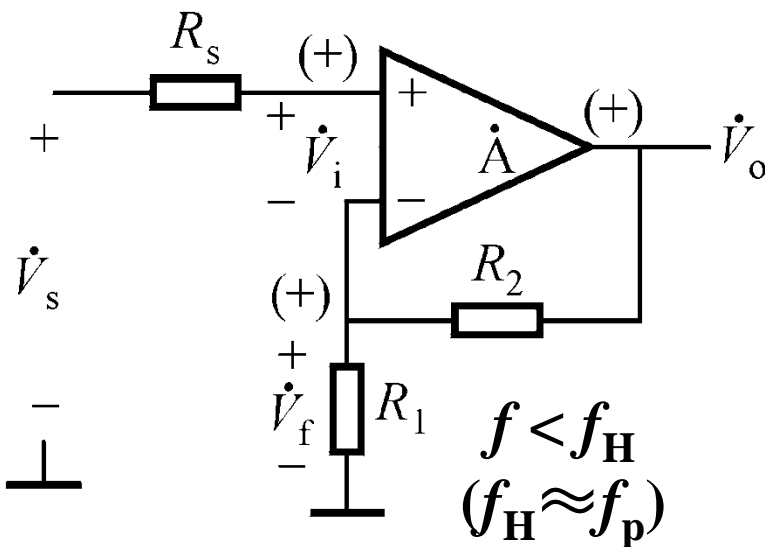
## 2.5 负反馈放大电路的稳定性

### 一、产生自激振荡的原因和条件

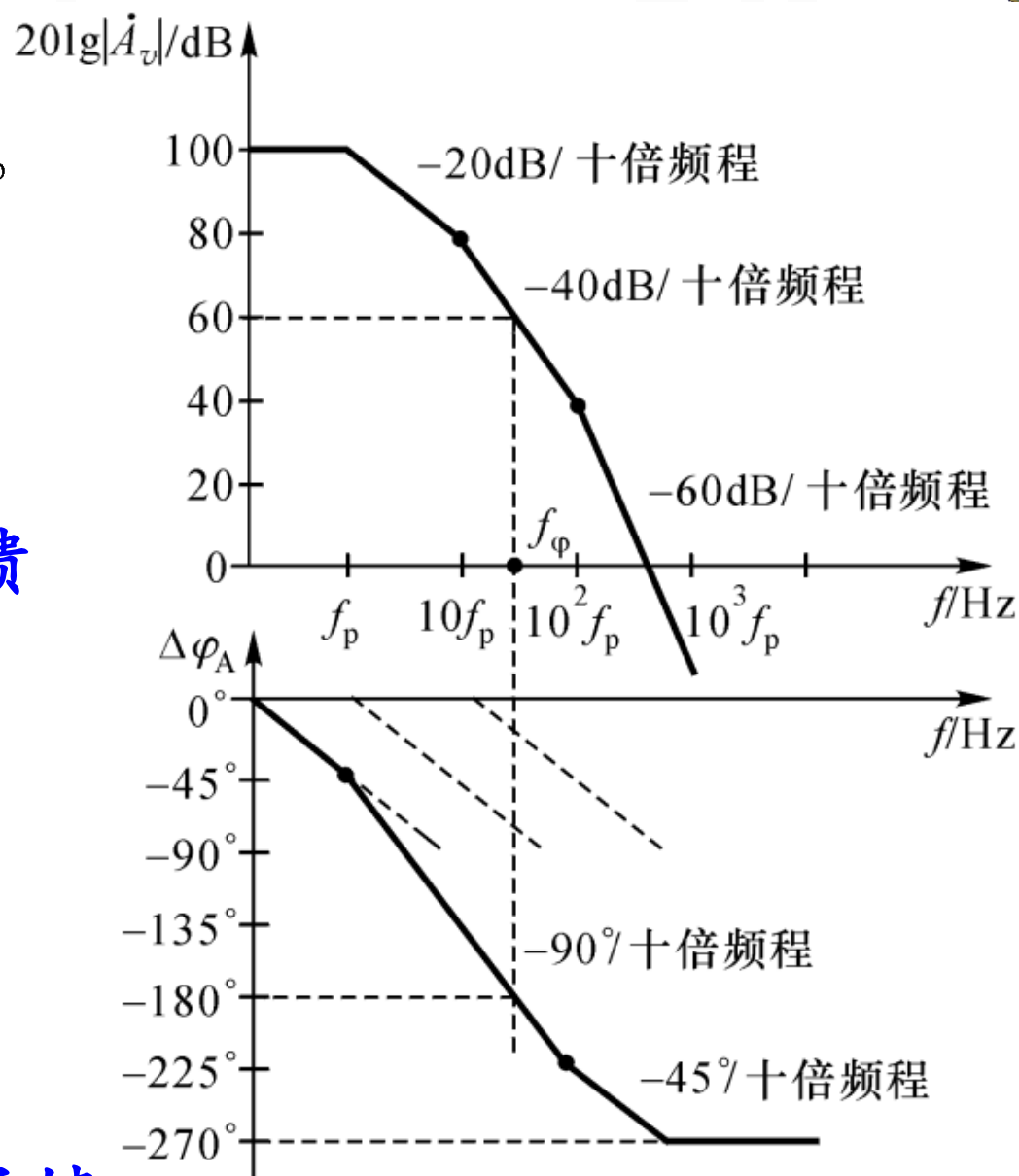
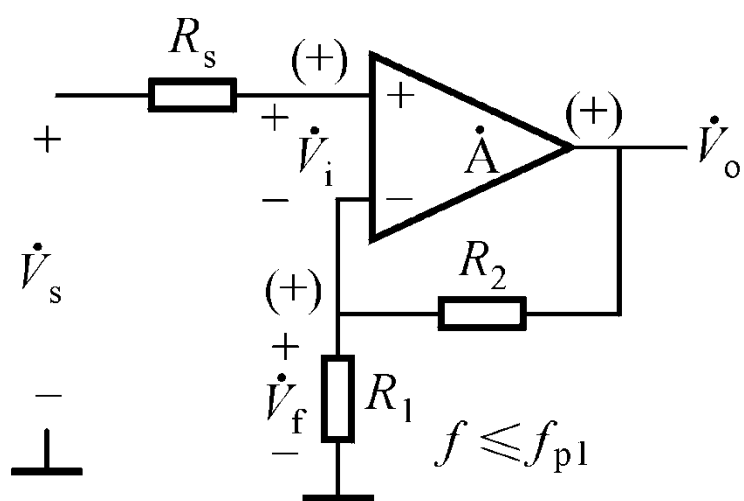
自激振荡是指没有输入信号 ( $v_i=0$ ) 时, 放大电路也有输出 ( $v_o \neq 0$ )。通常可用示波器观察到输出振荡波形, 这时放大器的闭环增益趋于无穷大。

以同相比例运算电路为例, 设集成运放有三个极点频率。

$$\dot{A}_v = \frac{10^5}{(1+j\frac{f}{f_p})(1+j\frac{f}{10f_p})(1+j\frac{f}{10^2f_p})}$$



先可画出开环对数幅频特性和相频特性曲线。



通频带外转变为正反馈





## ➤ 产生自激振荡的条件

负反馈放大电路产生自激振荡的原因之一就是由于反馈环路中的附加相移，使通频带内的负反馈在通频带外转变化正反馈。这一条件称为自激振荡的相位条件。

放大电路产生自激振荡，除了需满足相位条件外，还需满足一定的幅值条件。

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

若  $1 + \dot{A}\dot{F} = 0$ ，则  $\dot{A}_f = \dot{X}_o / \dot{X}_s \rightarrow \infty$ ，说明在没有输入的条件下，放大电路也有输出，这意味着电路已产生了自激振荡。



产生自激振荡的条件为  $\dot{A}\dot{F} = -1$

$$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 & \rightarrow \text{幅值平衡条件} \\ \Delta\varphi_{AF} = \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = \pm(2n+1)\pi & \rightarrow \text{相位平衡条件} \end{cases}$$

只有同时满足这两个条件，电路才会产生自激振荡。但刚开始起振时，自激振荡幅度有一个由小到、不断增长的过程，因此要求

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1 \quad \rightarrow \text{起振条件}$$

当满足自激的相位条件和幅值的起振条件时，负反馈放大电路将产生自激振荡，并且振荡幅度不断增大。但由于放大器件的非线性特性，最终必定到达幅值平衡条件，振荡幅度将不再增长。



## 二、利用波特图判断放大电路的稳定性

### ➤ 稳定判据

只有当负反馈放大电路不能同时满足产生自激的幅值条件和相位条件时，放大电路才是稳定工作的(不会产生自激振荡)。

负反馈放大电路的两个稳定判据(判别电路稳定工作的条件)：

①当  $\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = \pm 180^\circ$  时，若  $|\dot{A}\dot{F}| < 1$ ，则电路是稳定的；

②当  $|\dot{A}\dot{F}| = 1$  时，若  $|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F| < 180^\circ$ ，则电路是稳定的。

通常利用环路增益  $\dot{A}\dot{F}$  的波特图来判别负反馈放大电路是否会产生自激振荡。

【示例】 判别对应的负反馈放大电路能否稳定工作。

【解】

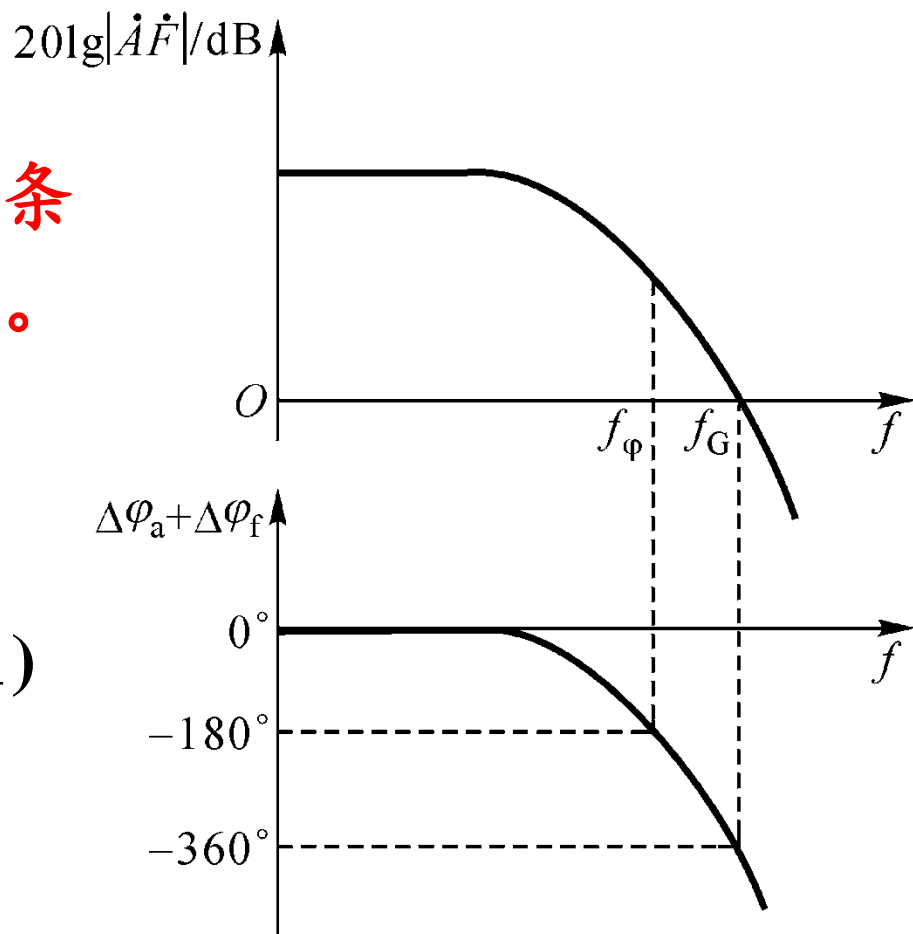
✧ 利用判据①：在相位条件满足时看幅度条件。

当  $f = f_\varphi$  时，

$$\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = -180^\circ$$

$$20\lg|\dot{A}\dot{F}| > 0 \quad (|\dot{A}\dot{F}| > 1)$$

该电路产生自激振荡。



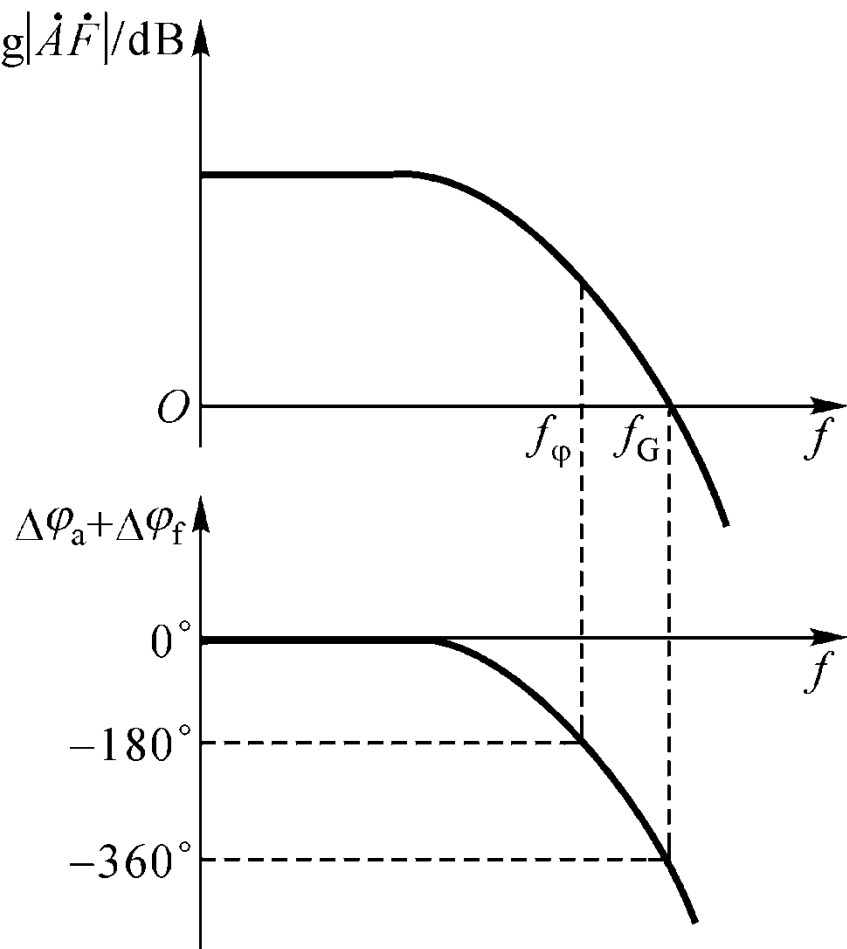
☆ 利用判据②：在幅度  
条件满足时看相位条  
件。

当  $f = f_G$  时，

$$20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0 \quad (|\dot{A}\dot{F}| = 1)$$

$$|\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F| > 180^\circ$$

同样也可以判断该  
电路会产生自激振荡。





## ➤ 稳定裕度

从工程应用的角度来看，仅仅保证放大电路在一定条件下不产生自激振荡是远远不够的，因为当条件稍有变化时，本来稳定工作的电路就有可能产生自激振荡。为此，要求放大电路**具有一定的稳定裕度**。

### ✧ 增益裕度 $G_m$

当电路的附加相移满足  $\Delta\varphi_A + \Delta\varphi_F = \pm 180^\circ$  时，其对应的环路增益称为增益裕度。

$$G_m = 20\lg |\dot{A}\dot{F}|_{f=f_\varphi} \text{ (dB)}$$

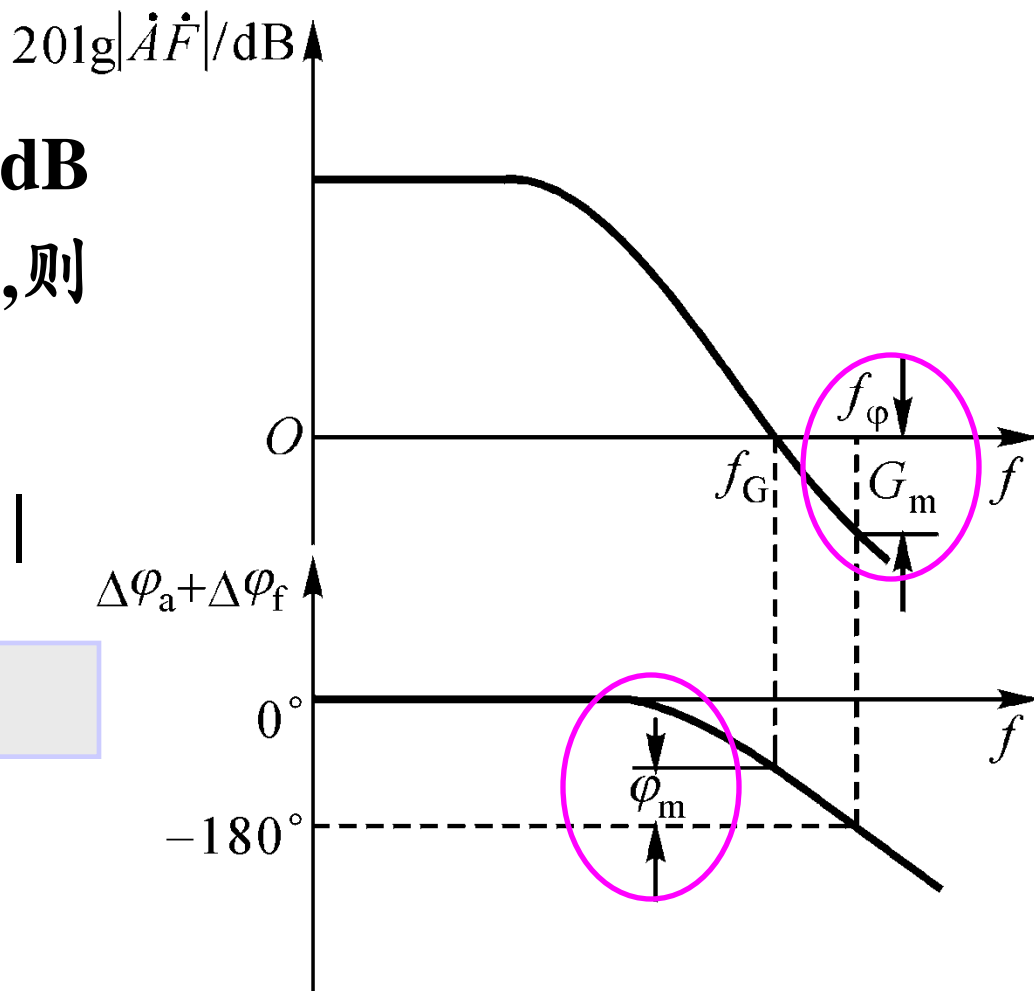
增益裕度应为负值，工程上要求  $G_m \leq -10\text{dB}$ 。

# ✧ 相位裕度 $\varphi_m$

设  $20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 0$  dB  
时所对应的频率为  $f_G$ , 则  
相位裕度为

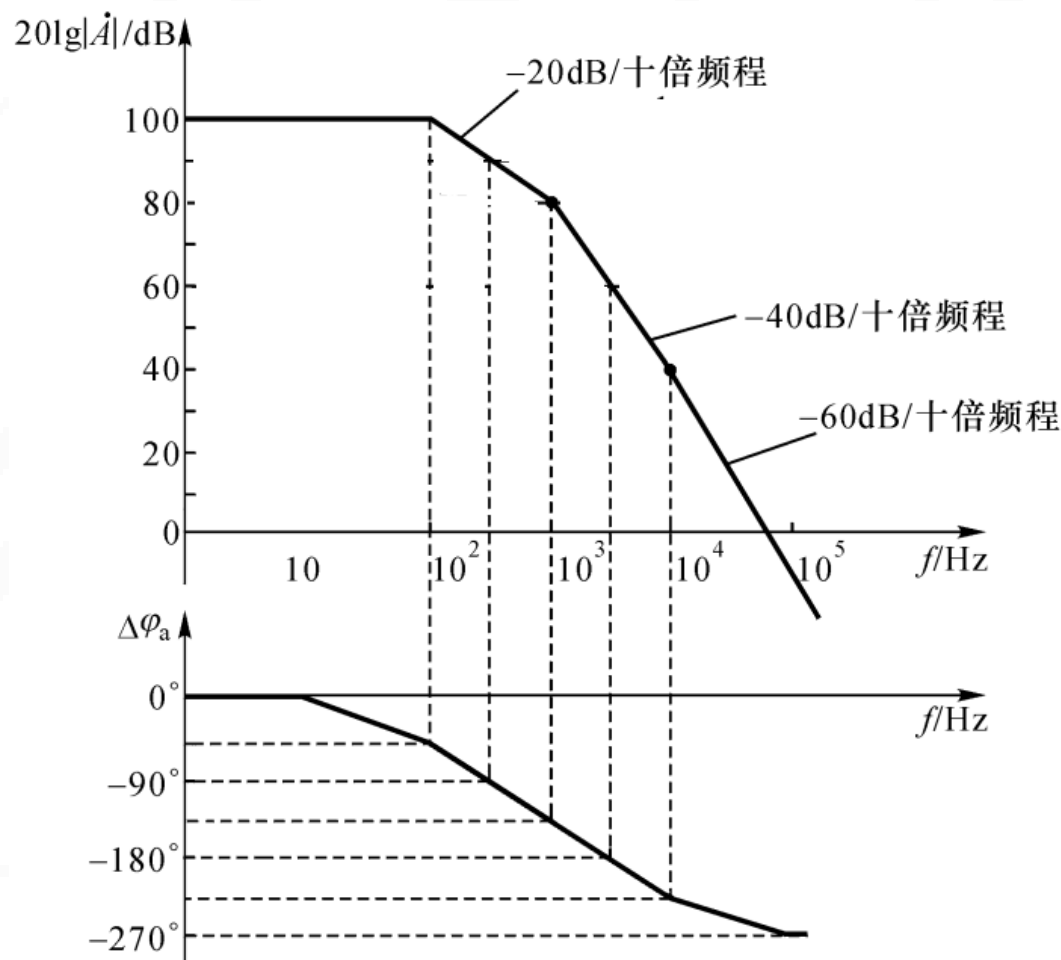
$$\varphi_m = 180^\circ - |\varphi(f_G)|$$

工程上要求  $\varphi_m \geq 45^\circ$ 。



稳定性的判别和稳定裕度也可以通过开环频率特性来分析。

【例1】某负反馈放大电路的其开环幅频和相频特性曲线如图，设反馈网络由纯电阻构成。对于不同的反馈系数 $F_1=10^{-4}$ 、 $F_2=10^{-3}$ 、 $F_3=10^{-2}$ ，电路是否会产生自激振荡？





【解】 作反馈线。

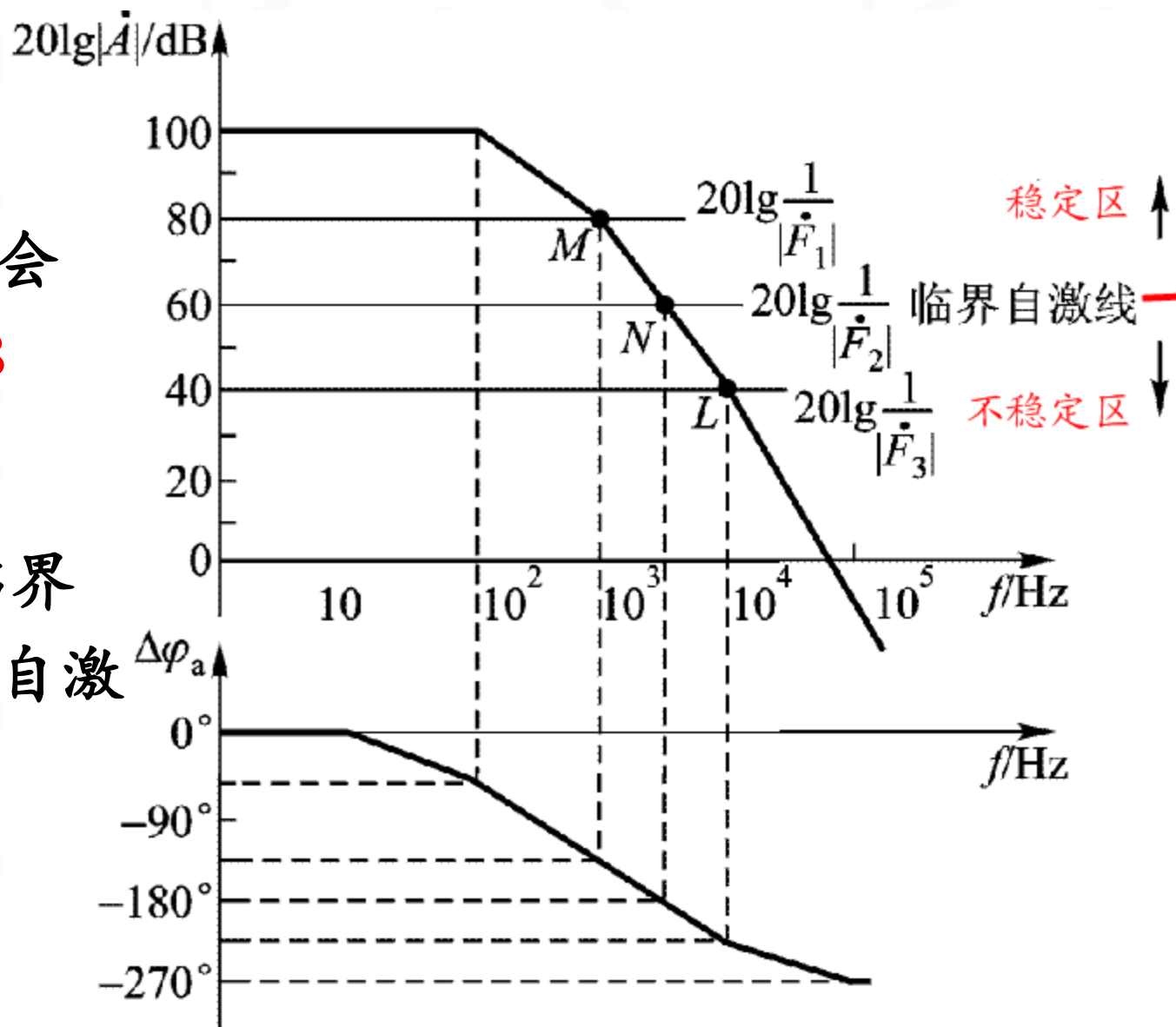
$F_1=10^{-4}$ : 不会

$G_m = -20\text{dB}$

$\varphi_m = 45^\circ$

$F_2=10^{-3}$ : 临界

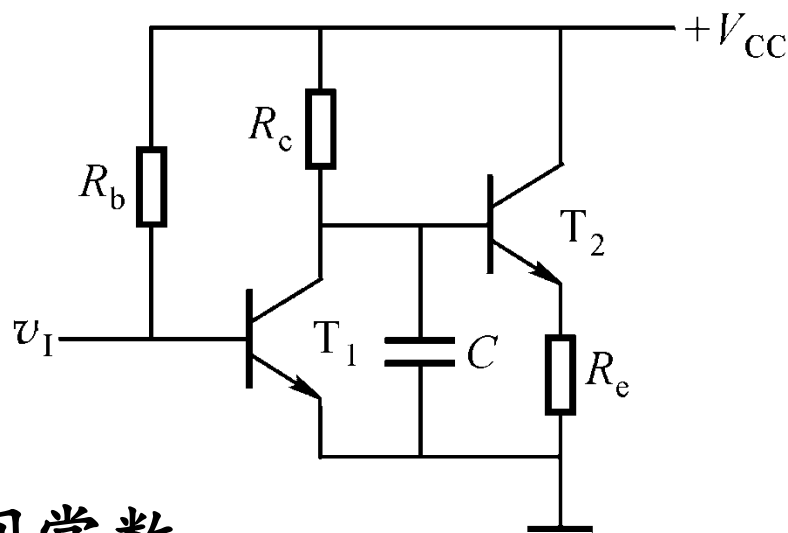
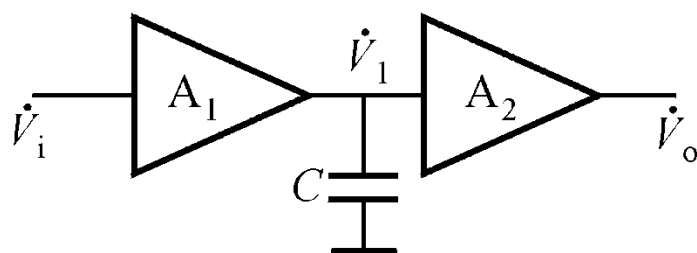
$F_3=10^{-2}$ : 会自激



### 三、消除自激振荡的方法（自学）

相位补偿法（频率补偿法）是在反馈放大电路的适当部分加入RC网络，改变环路增益的频率响应，使得反馈放大电路在增益裕度和相位裕度满足要求的前提下，能获得较大的环路增益。

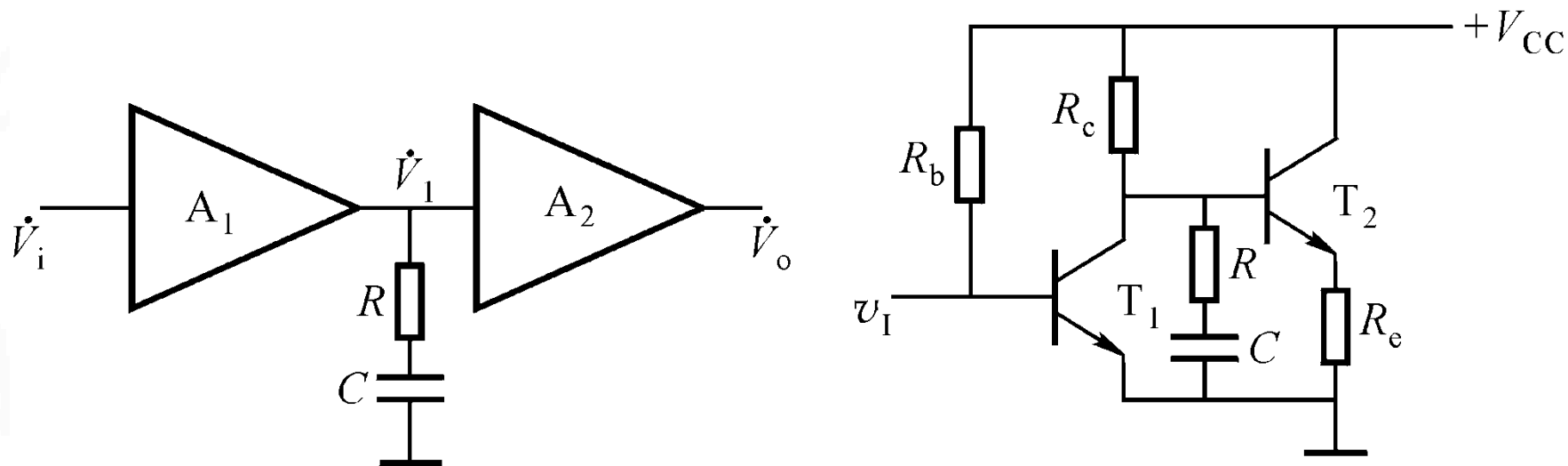
#### ➤ 电容滞后补偿



通常将电容接在时间常数最大的回路中。补偿后通频带变窄，又称窄带补偿。

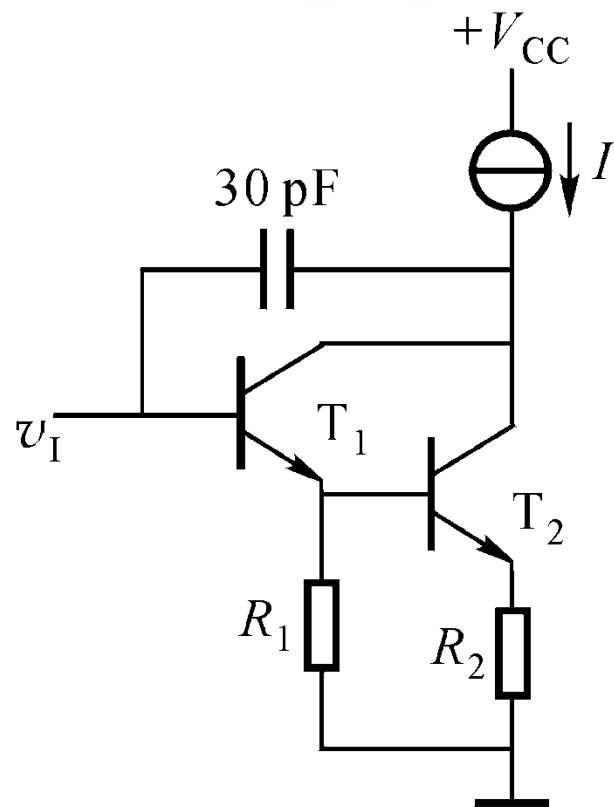
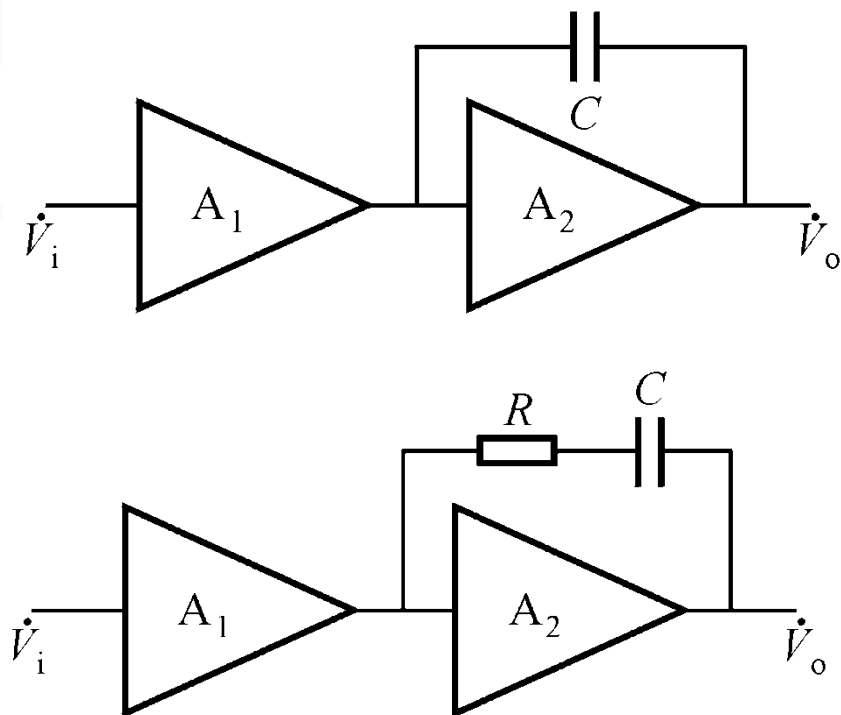


## ➤ RC滞后补偿



通常将RC网络接在时间常数最大的回路中。  
补偿后的频带比电容补偿时损失小一些。

## ➤ 密勒效应补偿



将补偿电容或RC补偿网络跨接在电路中，利用密勒效应可以达到增大电容的作用，因此补偿电容可以较小。



## 本章重点提示:

- ✧ 掌握反馈的基本概念（环路增益、反馈深度、不同组态下的增益表达式）。
- ✧ 会判断反馈组态和极性（正/负反馈、电压/电流、串联/并联）；会确定反馈量、净输入量。
- ✧ 理解负反馈对性能指标的改善作用，会根据应用要求选择合适类型的反馈组态。
- ✧ 熟练掌握运放构成的几种运算电路（比例、积分电路）。
- ✧ 理解虚短虚断的含义；会应用虚短虚断分析教复杂的运算电路。
- ✧ 会分析分立元件构成的深度负反馈放大电路。
- ✧ 掌握放大电路稳定性条件，会根据波特图判断是否稳定，会计算稳定裕度。
- ✧ 了解消除自激振荡的三种方法。



# 作业：

**题2.1**

**题2.7**

**题2.12**

**题2.14**

**题2.15(b)(d)(e)(f)**

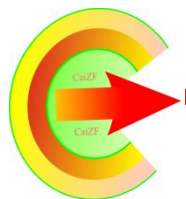
**题2.21**

**题2.22**

**提示：题2.15 图(d)(e) 书后答案有误。**



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.51

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2020年